

Beherrschbarkeit von teilautomatisierten Eingriffen in die Fahrzeugführung

Von der Fakultät für Lebenswissenschaften

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

(Dr. rer. nat.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

von Andro Torben Kleen

aus Duisburg

1. Referent:

Prof. Dr. Mark Vollrath

2. Referent:

Prof. Dr. Klaus Bengler

eingereicht am:

16.12.2013

mündliche Prüfung (Disputation) am:

13.05.2014

Druckjahr 2014

Vorveröffentlichungen der Dissertation

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Fakultät für Lebenswissenschaften, vertreten durch den Mentor der Arbeit, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Publikationen

Aktiv-Abschlussbericht. "Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr" gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Internes Dokument (2011).

Liebing, A. (2009). Ein Untersuchungsansatz zur Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen (nichtveröffentlichte Studienarbeit). Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

Tagungsbeiträge

Kleen, A., & Vollrath, M. (2012). Beherrschbarkeit von komplexen Eingriffen in die Fahrzeugführung. In: VDI Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.). Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit. 27. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG. Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung „Fahrerarbeitsplatz“ der Volkswagen Konzernforschung. Während ihrer Entstehung wurde ich durch viele engagierte Personen unterstützt, denen ich zu großem Dank verpflichtet bin.

An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer und Mentor Professor Dr. Mark Vollrath danken, dessen kontinuierliche Unterstützung eine unersetzliche Hilfe und Motivation während der Entstehung dieser Arbeit war. Die häufigen Gelegenheiten den Stand der Arbeit zu diskutieren und die zahlreichen Ratschläge, ob inhaltlicher, methodischer oder schlichtweg organisatorischer Natur, waren zu jeder Zeit bereichernd. Ebenso möchte ich mich bei Professor Dr. Klaus Bengler für die bereitwillige Übernahme des Koreferats und bei Professor Dr. Frank Eggert für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes herzlich bedanken.

Mein weiterer Dank gilt meinen früheren Vorgesetzten Dr. Miklós Kiss und Dr. Peter Oel, auf deren Initiative diese Arbeit zurückgeht. Dr. Helge Neuner und Lennart Bendewald haben im Anschluss daran mein Vorhaben in gleicher Weise gefördert und für das manchmal schwierige Thema der „Beherrschbarkeit“ das notwendige Augenmaß an den Tag gelegt. Dafür und für die damit verbundenen Freiheiten in der Ausgestaltung möchte ich mich auch bei ihnen herzlich bedanken.

Zudem bin ich einer Vielzahl von Kollegen zu Dank verpflichtet, ohne deren Unterstützung dieses Vorhaben nicht zu realisieren gewesen wäre. Dr. Thomas Eigel, Dr. Jiří Jerhot und Eckhard Babbel möchte ich dabei meinen besonderen Dank aussprechen. Ihre Arbeiten stellen die Grundlagen meiner Untersuchungen dar und haben die praktischen Umsetzungen überhaupt erst ermöglicht. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kollegen der Abteilung Fahrerarbeitsplatz und insbesondere bei Ina Petermann, Johannes Rhede und Dr. Linn Hackenberg bedanken. Unsere gemeinsame Arbeit in der Konzernforschung hat maßgeblich dazu beigetragen, dass ich mein Arbeitsumfeld als besonders interessant und produktiv empfunden habe. Mein Dank gilt ebenfalls allen Studenten, deren Arbeiten ich im Verlauf meiner Tätigkeit betreuen durfte. Bei Alexander Liebing und Lina Albrecht möchte ich mich für die unermüdliche Unterstützung in der Durchführung und der Korrektur dieser Arbeit bedanken.

Dr. Gerrit Schmidt, Matthias Heesen und Jörn Paulig möchte ich gleich in zweifacher Hinsicht danken. Zum einen für die zahlreichen und interessanten Diskussionen, die mir stets eine bessere Sicht auf die nächsten notwendigen Schritte ermöglicht haben. Zum anderen möchte ich mich für unsere schöne gemeinsame Zeit in Braunschweig bedanken, die ganz entschieden dazu beigetragen hat, dass der Entstehungsprozess dieser Arbeit einen besonders wertvollen Abschnitt für mich darstellt.

Mein ganz besonderer Dank gilt schließlich meinen Eltern und meinem Bruder. Die fortwährende Unterstützung meiner Familie hat mich erst in die Lage versetzt, mein Promotionsvorhaben umzusetzen. Ihr Rückhalt hat wesentlichen Anteil an dem erfolgreichen Abschluss meiner Arbeit.

Braunschweig, im Juni 2014

Andro Kleen

Inhalt

1	Einführung und Überblick	8
2	Theoretischer Hintergrund	11
2.1	Fahrerassistenzsysteme und Funktionen des automatisierten Fahrens	11
2.1.1	Kategorisierungen und Definitionsansätze	12
2.1.2	Vernetzung und Integration von Assistenzfunktionen	18
2.2	Fahreraufgaben während manueller Fahrten	21
2.3	Anforderungen teilautomatisierter Fahrfunktionen an den Fahrer	24
2.4	Die Überwachung teilautomatisierter Fahrfunktionen	29
2.4.1	Konzepte des Situationsbewusstseins	31
2.4.2	Auswirkungen teilautomatischer Fahrfunktionen auf das Situationsbewusstsein	34
2.5	Die Übersteuerung teilautomatisierter Fahrfunktionen	37
2.6	Bewertung der Beherrschbarkeit von automatischen Fahrfunktionen	39
2.6.1	Anforderungen des Response Code of Practice	39
2.6.2	Bewertung von Übernahmeszenarien	43
2.6.3	Bewertung von Fehlerbildern	47
2.6.3.1	Auswirkungen der Eigenschaften von Fehlerbilder	48
2.6.3.2	Einflüsse des Fahrscenarios	51
2.6.3.3	Objektive Führungsgrößen der Störungsbewertungen	53
3	Zentrale Fragestellungen	55
4	Auswirkung von Systemeingriffen, Deaktivierungen und des Fahrscenarios auf das Fahrerverhalten	58
4.1	Ziel und Fragestellung	58
4.2	Methodik	58
4.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	58
4.2.2	Versuchsdesign und Umsetzung der Fahrscenarios	59
4.2.3	Maße zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion	61
4.2.4	Stichprobe	64
4.2.5	Analyseverfahren	65
4.3	Ergebnisse zu den Auswirkungen von Systemstatus und des Fahrscenarios	65
4.3.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zu Systemstatus und Fahrscenarios	73
4.4	Ergebnisse zu den Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsrichtung	74
4.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zur longitudinalen Eingriffsrichtung	79
4.5	Bewertung der Ergebnisse	79
4.5.1	Fazit zur Beherrschbarkeit von Übernahmesituationen	79
4.5.2	Fazit zur Beherrschbarkeit von Systemeingriffen	80
4.5.3	Beherrschbarkeit von Übernahmesituationen und Systemeingriffen im Vergleich	81
4.5.4	Fazit zu den Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsrichtung	81
4.6	Einschränkungen und weiterer Analysebedarf	82

5	Einflüsse von Intensität und Richtung bei kombinierten Eingriffen in die Fahrzeugführung	84
5.1	Methodisches Vorgehen und Bewertungsansatz	84
5.1.1	Variation von Stärke und Richtung der Eingriffskombinationen	84
5.1.2	Fahrszenarien der Realfahrtstudie.....	85
5.1.3	Maße der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion.....	87
5.1.4	Stichprobe, Datenanalyse und Ergebnisdarstellung	88
5.2	Einflüsse von Stärke und Richtung der Eingriffskombinationen	91
5.2.1	Auswirkungen in der Geradeausfahrt	91
5.2.1.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Geradeausfahrt	101
5.2.1.2	Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen in der Geradeausfahrt	104
5.2.2	Auswirkungen in der Kurvenfahrt.....	107
5.2.2.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Kurvenfahrt.....	120
5.2.2.2	Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen der Kurvenfahrt	122
5.2.3	Auswirkungen in der Engstelle.....	124
5.2.3.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Engstelle	134
5.2.3.2	Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen der Engstelle	135
5.2.4	Auswirkungen innerhalb des Fahrstreifenwechsels	137
5.2.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zum Fahrstreifenwechsel	146
5.2.4.2	Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen des Farstreifenwechsel-Szenarios	148
5.3	Vergleich der Auswirkungen von Beschleunigungskombinationen in den untersuchten Fahrszenarien	150
5.3.1	Fazit zum Vergleich der Auswirkungen von Fahrszenario und Beschleunigungsintensität	155
6	Zusammenhänge zwischen resultierenden Fahrzeugreaktionen und Störungsbewertungen	157
6.1	Zusammenhänge unter Berücksichtigung aller Eingriffskombinationen.....	159
6.2	Zusammenhänge für Eingriffskombinationen mit positiver Längsbeschleunigung.....	161
6.3	Zusammenhänge für Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponente	163
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen resultierenden Fahrzeugreaktionen und Störungsbewertungen	164
7	Zusammenfassende Diskussion	166
8	Literaturverzeichnis.....	177
9	Anhang	182

1 Einführung und Überblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Beherrschbarkeit von automatischen Fahrfunktionen. Hierbei stehen Funktionen im Vordergrund, die gleichzeitig die Quer- und Längsführung eines Fahrzeuges beeinflussen können. Eingriffe dieser Art können zum Beispiel bei der Ausführung von kurzfristigen Lenk-Brems-Manövern helfen. Darüber hinaus können Fahrer dadurch in niedrigeren oder höheren Geschwindigkeitsbereichen kontinuierlich entlastet werden. Weitere Anwendungsfälle betreffen die Unterstützung oder vollständige Ausführung von Parkmanövern. Im Gegensatz zu Systemen, die als „hoch-“ oder „vollautomatisierte“ Fahrfunktionen bezeichnet werden, müssen die hier betrachteten „teilautomatisierten“ Systeme permanent durch den Fahrer überwacht werden. Die Fahraufgabe muss dabei „ohne zeitliche Reserve“ wieder vom Fahrer übernommen werden können (Gasser et al., 2012).

Die Frage nach der Beherrschbarkeit solcher Funktionen stellt sich aus mehreren Gründen. Zum einen werden bereits für herkömmliche Assistenzsysteme Bewertungen gefordert, die sich auf den Normalbetrieb, den Umgang mit Systemgrenzen als auch auf den Umgang mit möglichen Systemfehlern beziehen. Diese „formalen“ Anforderungen werden zum Beispiel innerhalb des Response Code of Practice (PReVENT, 2009) beschrieben und sollen sicherstellen, dass Fahrer zu jeder Zeit in der Lage sind, das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu überführen. Vergleichbare Forderungen sind für den Bereich der teilautomatisierten Systeme sinnvoll und wahrscheinlich. Die vorliegende Arbeit soll dabei keine abschließende Betrachtung zur Beherrschbarkeit von teilautomatisierten Systemen leisten, sondern einen Beitrag zu den Bewertungsgrundlagen derartiger Funktionen liefern.

Diesbezüglich werfen aktuelle Forschungsarbeiten zu teilautomatisierten Fahrfunktionen Fragen auf, die sich auf die Prozesse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion beziehen. Diese „inhaltlichen“ Fragestellungen untersuchen im Wesentlichen zwei Aspekte: Einerseits wird der Frage nachgegangen, inwieweit Fahrer in der Lage sind, im Falle von Übernahme-situationen angemessen zu reagieren. Die theoretischen und empirischen Erkenntnisse zu diesem Themengebiet erlauben sowohl den Schluss eines verbesserten als auch eines herabgesetzten Reaktionsvermögens, sodass sich eine genauere Betrachtung dieser Prozesse anbietet. Andererseits stellen kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung eine neue Qualität der automatischen Fahrerunterstützung dar. Hierbei muss davon ausgegangen werden, dass Fahrer wenig Erfahrung in der Kontrolle von „zweidimensionalen“ Eingriffen haben. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegen nur wenige Erkenntnisse zu diesen Eingriffsbildern vor. Auch diese Tatsache legt eine genauere Betrachtung der Interaktionsmuster nahe.

Um diese Fragestellungen zu untersuchen, werden zunächst die definitorischen und theoretischen Rahmenbedingungen der teilautomatisierten Fahrer-Fahrzeug-Interaktion analysiert. Hierbei erweist sich die von Gasser et al. (2012) vorgelegte Definition verschiedener Automatisierungsgrade als hilfreich, indem die beschriebenen Charakteristika einer teilautomatisierten Fahrfunktion direkt in konkrete Beherrschbarkeits-Anforderungen überführt werden können. Als generelle Rahmenbedingungen greifen zudem die Kriterien des oben erwähnten „Response Code of Practice“. So kann die Beherrschbarkeit von Systemgrenzen durch den Umgang mit plötzlichen Übernahme-situationen, also dem unmittelbaren Verlust der automatischen Unterstützung, operationalisiert werden.

Des Weiteren werden kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung vor dem Hintergrund möglicher Systemfehler betrachtet. Insbesondere die Auswirkungen wichtiger Eigenschaften dieser Eingriffe, wie Stärke und Richtung der Manipulationen, werden dabei als relevante Aspekte der Beherrschbarkeit identifiziert.

Weiterhin werden verschiedene Aspekte aufgegriffen, die sich in bisherigen Arbeiten als relevant für die Bewertung der Beherrschbarkeit erwiesen haben. Hierzu gehört unter anderem die Identifikation sensibler Fahrszenarien, in denen die Auswirkungen plötzlich auftretender Ereignisse besonders gut untersucht werden können. Die Zusammenstellung der theoretischen Rahmenbedingungen und bisherigen Erkenntnisse zeigt zudem, dass die Wahrnehmungs- und Urteilssystematik von teilautomatisierten Eingriffen noch weitgehend ungeklärt ist. Fragestellungen dieser Art zielen auf die Objektivierung der Fahrerwahrnehmung und haben die Identifikation fahrzeugunabhängiger Kennwerte der Beherrschbarkeit zum Ziel.

Nach der Ableitung zentraler Fragestellungen werden Aufbau und Ergebnisse zweier empirischer Studien beschrieben. Eine erste Untersuchung, die in einem feststehenden Fahrsimulator durchgeführt wurde ($n=59$), konzentriert sich auf den Vergleich von Übernahmesituationen und Systemeingriffen. Diese systembasierten Ereignisse werden innerhalb einer Geradeausfahrt, einer Einfahrt in eine simulierte Baustelle und innerhalb eines Kurvenszenarios untersucht. Als Grundlage des Vergleichs dienen die subjektiven Störungsbewertungen nach Neukum & Krüger (2003) und diverse Verhaltensmaße.

Eine zweite Studie untersucht die Auswirkungen von kombinierten Eingriffen in die Fahrzeugführung. Zu diesem Zweck wurden 55 Probanden im Rahmen einer Realfahrtstudie mit gleichzeitigen Eingriffen in die Quer- und Längsführung konfrontiert. Da in dieser Untersuchung ein besonderes Interesse an der Rolle von Intensität und Richtung der Kombinationen bestand, wurden beide Einflussgrößen systematisch variiert. Zusätzlich wurden den Probanden alleinige Lenkeingriffe dargeboten. Dieses Vorgehen ermöglicht einen Vergleich zwischen den Auswirkungen kompletter, teilautomatisierter Eingriffskombinationen und den herkömmlichen, assistenzbasierten Eingriffen in die Querführung.

Auch diese Untersuchung betrachtet teilautomatisierte Eingriffe in unterschiedlichen Fahrsituationen. Neben verschiedenen Szenarien der Simulatorstudie beinhaltete das Untersuchungsszenario zudem einen Fahrstreifenwechsel und eine Engstelle. Innerhalb dieses Settings können 20 Fehlerbilder in vier verschiedenen Fahrszenarien untersucht werden. Auch hierbei werden sowohl die subjektiven Störungsbewertungen als auch verschiedene Verhaltensparameter berücksichtigt.

Dieses Vorgehen ermöglicht sowohl inhaltliche als auch methodische Schlüsse. Die inhaltlichen Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf die konkreten Auswirkungen der teilautomatisierten Eingriffe, während die methodischen Erkenntnisse die Gestaltung des Bewertungsprozesses betreffen. Da teilautomatisierte Systeme gleichzeitig in die Quer- und Längsführung eingreifen, stellt sich hier zunächst die Frage, inwieweit bereits getrennte Darbietungen von lateralen oder longitudinalen Manipulationen Aussagen über die Beherrschbarkeit von ganzen Kombinationen ermöglichen.

Weiterhin wird untersucht, welche Verhaltensmaße besonders aussagekräftig für die Beschreibung der teilautomatisierten Fahrer-Fahrzeug-Interaktion sind. Da im Bereich der „lateralen Beherrschbarkeit“ bereits sensitive Parameter entwickelt wurden, sollte geklärt werden, ob sich diese Maße auch für die Analyse von teilautomatisierten Funktionen eignen. Hierbei ist von besonderem Interesse, ob sich in den primär lenkungsbezogenen Maßen (z. B. anhand des „maximalen Lenkradwinkels“ in der Folge eines dargebotenen Lenkeingriffs) auch Auswirkungen der longitudinalen Eingriffskomponente (z. B. die Folgen eines gleichzeitig dargebotenen Beschleunigungsmanövers) feststellen lassen. Erkenntnisse dieser Art sollen dabei helfen, ein aussagekräftiges Set relevanter Verhaltensmaße zu definieren.

Um zu untersuchen, wie Fahrer teilautomatisierte Eingriffe erleben und bewerten, werden schließlich die subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen auf Kennwerte der resultierenden Fahrzeugreaktion bezogen. Die bisherigen Erkenntnisse zur Wahrnehmung von fahrdynamischen Ereignissen beschränken sich auf Eingriffe von Querführungssystemen. Um jedoch Aussagen über die subjektive Beherrschbarkeit von teilautomatisierten Systemen treffen zu können, müssen auch Eingriffe in die Längsführung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird der Frage nachgegangen, ob und wie sich die Fahrerurteile durch Kennwerte der Gierrate und der Längsbeschleunigung nachvollziehen und vorhersagen lassen.

Die hier beschriebenen Untersuchungsansätze sollen dabei helfen, Grundlagen für die Bewertung zukünftiger Systeme zu schaffen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass sich die Rolle des Fahrers mit der Nutzung teilautomatisierter Systeme weiter verändern wird. Zumindest in Teilen wird die primäre Fahreraufgabe nicht mehr in der Fahrzeugsteuerung, sondern in der Überwachung und gegebenenfalls in der Korrektur von automatisch ausgeführten Eingriffen liegen. Um Fahrer in die Lage zu versetzen, diese neuen Aufgaben erfolgreich zu bewältigen, bedarf es entsprechender Interaktionskonzepte. Deren Gestaltung setzt wiederum ein Verständnis der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion und insbesondere ein Verständnis potentiell problematischer Aspekte voraus.

Die vorliegende Arbeit soll dabei helfen, wichtige Fragen der zukünftigen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu beantworten. Was macht Eingriffe störend oder sogar potentiell kritisch? Woran machen Fahrer ihr Urteil darüber fest? Unter welchen Bedingungen gelingt der Umgang mit unerwünschten Ereignissen besonders gut? Die Auseinandersetzung mit diesen Fragen soll zu einer fahrerzentrierten Gestaltung neuer Systeme und damit zu einem sicheren und entspannten Fahren der Zukunft beitragen.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Fahrerassistenzsysteme und Funktionen des automatisierten Fahrens

Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind mittlerweile fester Bestandteil der automobilen Produktpalette und finden in vielen Serienfahrzeugen ihren Einsatz. Systeme, die den Fahrer in der Ausführung der Fahraufgabe unterstützen, sind dabei in einer so großen Bandbreite erhältlich, dass eine einheitliche Beschreibung nicht möglich ist. Fahrer können zum gegenwärtigen Zeitpunkt bereits in nahezu allen Verkehrsbereichen unterstützt werden. In höheren Geschwindigkeitsbereichen, wie z. B. auf Autobahnen oder Landstraßen helfen Assistenzsysteme bei der Längsführung, indem der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen automatisch eingehalten wird (z. B. durch ein „Adaptive Cruise Control-System“, ACC). Die Querführung wird bereits in vielen erhältlichen Fahrzeugen durch Spurhalteassistenten aktiv beeinflusst (z. B. „Heading Control“, HC) oder durch sogenannte Spurverlassenswarner („Lane Keeping Assistance“, LKA) unterstützt. Im Stadtbereich können Fahrer bei der Ausführung von Parkmanövern unterstützt werden, indem entweder optisch-akustische Abstandswarnungen ausgegeben oder ganze Teilaufgaben des Parkvorgangs automatisch ausgeführt werden. Einen Überblick über die Vielfalt bereits erhältlicher Systeme zeigt Tabelle 2 nach Vollrath und Krems (2011).

Mit dem Einsatz von Fahrerassistenzsystemen werden verschiedene positive Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen verbunden. Vorzugsweise sollen diese Systeme dabei helfen, den Fahrer zu entlasten und auf individueller Ebene eine geringere Beanspruchung und eine sichere Verkehrsteilnahme zu ermöglichen. Darüber hinaus werden jedoch weitere Verbesserungen angenommen. Die Initiierung nationaler und internationaler Förderprojekte zur Entwicklung und Bewertung neuer Funktionen (z. B. UR:BAN-Projekt, RESPONSE-Projekt) sowie die Einbindung von Versicherungsunternehmen in solche Projekte (z. B. Aktiv-Projekt mit Beteiligung der Allianz SE) spiegeln die Erwartungen von gesamtgesellschaftlichen Effekten wider. Dazu gehören Annahmen einer insgesamt verbesserten Verkehrssicherheit, wie sie z. B. von Vollrath und Krems (2011) oder von Daschner et al. (2009) diskutiert werden. Inwieweit die Bedeutung von Fahrerassistenzsystemen für das allgemeine Verkehrsgeschehen zugenommen hat, lässt sich auch an anderer Stelle beobachten. Aktuell werden Überlegungen angestellt, Lehrmaterial über gängige Assistenzfunktionen in die Fahrausbildung aufzunehmen (z. B. deutsche-fahrlehrer-akademie.de). Neben den individuellen und eher gesellschaftlichen Auswirkungen hat die fortschreitende Entwicklung und Einführung elektronischer Fahrfunktionen auch juristische Diskussionen angestoßen, die sowohl verkehrsrechtliche als auch haftungsrechtliche Aspekte betreffen (z. B. Gasser, 2012).

Wie im Folgenden zu zeigen sein wird, sind mit dem Einsatz von Assistenzsystemen jedoch nicht nur positive Auswirkungen verbunden. Vollrath und Krems (2011) beschreiben in diesem Zusammenhang mögliche unerwünschte Effekte, wie den Verlust der eigentlichen Fahrkompetenzen, Risikokompensation und Systemmissbrauch. Popken (2009) untersucht darüber hinaus psychische Adaptionsprozesse (z. B. Veränderungen des Situationsbewusstseins oder der Vigilanz) und deren Zusammenhang zu einem übermäßigen Verlassen (Reliance) auf automatische Fahrfunktionen. Überlegungen dieser Art beziehen sich auf die reguläre Nutzung assistierender Systeme und auf deren „Normalbetrieb“. Zur Entwicklung

neuer Funktionen gehören jedoch auch Fragestellungen, die sich auf den Umgang mit möglichen Systemfehlern und Systemgrenzen beziehen. Bewertungen der Beherrschbarkeit von Fahrfunktionen, zu denen die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten soll, konzentrieren sich dabei auf die Analyse potentiell kritischer Situationen und auf die Fähigkeit des Fahrers, damit angemessen umzugehen. Ein generelles Anliegen hierbei ist die Entwicklung geeigneter Maße und Prüfscenarien, die eine angemessene Bewertung einzelner Funktionen ermöglichen. Aufgrund der großen Bandbreite von Assistenzsystemen stellt sich die Frage, welche Subgruppen von Systemen durch vergleichbare Ansätze untersucht werden und welche Bewertungskriterien hierbei herangezogen werden können. Im Folgenden soll daher zunächst auf gängige Klassifikationssysteme und einheitliche Subgruppen von Systemen eingegangen werden. Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, inwieweit die Definitionsansätze bereits die Ableitung von Kriterien ermöglichen, die die Beurteilung einer erfolgreichen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zulassen.

2.1.1 Kategorisierungen und Definitionsansätze

Die Vielzahl der Perspektiven auf den Bereich der Fahrerassistenz und die heterogene Wirkungsweise der unterschiedlichen Systeme erschweren eine einzelne, umfassende Definition. Aus diesem Grund wurden zur Beschreibung heutiger Assistenzfunktionen Klassifikationssysteme entwickelt, die eine Einordnung der jeweiligen Funktionalität anhand von Dimensionen vornehmen. Ziel dieser Ansätze ist es einerseits, die Funktionsweise aktueller Systeme zu beschreiben und andererseits das Gebiet der Assistenz von Systemen abzugrenzen, die auf anderen Automatisierungsgraden basieren.

Vollrath und Krems (2011) geben einen Überblick über verschiedene Definitionsansätze und beziehen sich zunächst auf ein von Sheridan und Verplank (1978) vorgeschlagenes Stufenkonzept (siehe Tabelle 1). Das Klassifikationssystem sieht zehn Stufen der Fahrzeugautomatisierung mit steigenden Automatisierungsanteilen vor. Eine Abgrenzung des Teilbereichs „Fahrerassistenzsysteme“ (kleiner oder gleich Automationsstufe fünf) wird, einem Vorschlag von Hauß und Timpe (2000) folgend, dann vorgenommen, wenn Systemhandlungen vor der eigentlichen Ausführung noch bestätigt werden müssen.

Tabelle 1: Kategorisierung automatischer Systeme von Sheridan & Verplank (1978) nach Vollrath & Krems (2011).

Automationsstufe	Beschreibung
1	Der Mensch fährt – manuelle Kontrolle
2	Das System bietet verschiedene Entscheidungs- oder Handlungsmöglichkeiten
3	Das System bietet wenige, ausgewählte Möglichkeiten an
4	Das System schlägt eine Handlungsmöglichkeit vor
5	Das System führt eine Handlung aus, wenn es der Fahrer bestätigt
6	Das System gibt dem Fahrer eine bestimmte Zeit, um die Handlungen zu verhindern
7	Das System handelt automatisch und informiert den Fahrer
8	Das System handelt automatisch und informiert nur, wenn es gefragt wird
9	Das System informiert den Fahrer nur, wenn es das für nötig hält
10	Das System macht alles automatisch und ignoriert den Fahrer

Vollrath und Krems stellen hierzu jedoch fest, dass eine klare Zuordnung aktueller Systeme nur eingeschränkt möglich ist. Ein ACC-System ist zwar entsprechend der Kategorie „Assistenzsystem“ von der Eingabe der Wunschgeschwindigkeit abhängig, regelt jedoch im Sinne einer „höheren Automatisierung“ eigenständig die Längsführung. Eine weitere von Vollrath und Krems beschriebene Klassifikationsmethode bezieht sich auf Überlegungen von Fastenmeier, Stadler und Lernen (1995): Hierbei wird der Automatisierungsgrad anhand der Klassen „Information“, „Warnung“, „Unterstützung“, „Korrektur“, „Teilautomation“ und „Vollautomation“ beschrieben (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Automatisierungsgrade von Fahrerassistenzsystemen nach Vollrath und Krems (2011).

Automatisierung	Detailstufe	Beispiel
Information	Abruf durch Fahrer	Abruf der Außentemperatur
	Ausgabe vom System initiiert	Abstand zum Vorderfahrzeug
Warnung	Ausgabe durch das System initiiert	Abstandswarnung, Auffahrwarnung
Unterstützung	Kontinuierlich verstärkend / abschwächend eingreifend	Heading Control System
Korrektur	Begrenzend, übersteuerbar	Geschwindigkeitsvorgabe über Aktives Gaspedal
	Begrenzend, nicht übersteuerbar	ABS
Automatisch	Initiiert durch Fahrer	ACC
	Initiiert durch System, vom Fahrer übersteuerbar	Leichte Kollisionsvermeidung nach Warnung
	Initiiert durch System, vom Fahrer nicht übersteuerbar	Automatische Notbremse

Auch hierbei handelt es sich um ein hierarchisches Konzept, indem auf untergeordnete Beschreibungsdimensionen zurückgegriffen wird. So unterscheiden sich „informierende“ Systeme von „Warnsystemen“ durch das Kriterium einer systemseitigen Situationsbewertung. Die Stufen „Unterstützung“, „Korrektur“ und „Automatisch“ grenzen sich wiederum durch die Dauer der jeweiligen Unterstützung, die Übersteuerbarkeit durch den Fahrer und durch dessen initiiierende Handlung ab. Die verschiedenen Dimensionen („Detailstufen“) werden hierbei nicht einheitlich auf jeden Automatisierungsgrad angewendet, sondern zum Teil spezifisch verwendet. Eine einheitliche Beschreibung verschiedener Systeme anhand homogener Subkategorien ist damit nicht möglich. Ebenso wird das für die Bewertung der Beherrschbarkeit relevante Kriterium der „Übersteuerbarkeit“ nur für die Automatisierungsstufen „Korrektur“ und „Automatisch“ verwendet und nicht auf unterstützende Systeme bezogen. Insgesamt zielt dieses Klassifikationssystem auf die Beschreibung von Systemeigenschaften und weniger auf die Definition der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ab. Die Operationalisierung der Interaktion und die Ableitung relevanter Bewertungskriterien sind damit nur eingeschränkt möglich.

Neben den oben beschriebenen Ansätzen führen Vollrath und Krems (2011) weitere Dimension auf, die in gängigen Definitionen zur Beschreibung automatischer Fahrfunktionen herangezogen werden. Dazu gehören:

- Automatisierungsgrad (z. B. informierend, warnend, eingreifend)
- Vorherrschendes Assistenzziel (Komfort, Sicherheit)
- Unterstützung kognitiver Prozesse (Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung, Aktionsentscheidung, Aktionsausführung)
- Unterstützte Teilfahraufgabe (Stabilisierung, Bahnführung, Navigation)
- Eingesetzte Sensorik (Onboard- oder externe Sensorik)
- Dauer der Unterstützung (temporär oder permanent)

Diese Klassifikationsmerkmale finden sich in verschiedenen Ausprägungen und Kombinationen in weiteren Begriffsklärungen wieder. Maurer (2009) zieht zur Schärfung des Assistenzbegriffs Überlegungen von Kraiss (1998) heran. Dessen Kriterium der Arbeitsteilung unterscheidet „serielle“, „parallele“ und „redundant-parallele“ Arbeitsteilungen zwischen Mensch und Maschine. Während in seriellen Zuständen verschiedene Tätigkeiten nacheinander von Mensch und Maschine ausgeführt werden, beschreibt die parallele Arbeitsteilung die zeitgleiche Ausführung verschiedener Aufgaben. Die dritte Form der redundant-parallelen Aufgabenausführung umfasst die zeitgleiche Ausführung der gleichen Aufgaben und charakterisiert die Arbeitsweise moderner Assistenzsysteme damit am treffendsten. Neben dem Kriterium der Arbeitsteilung schlägt Maurer zudem den Einbezug der Informationsaufnahme bzw. Wahrnehmung als zweite Definitions Komponente vor. Im Gegensatz zu „konventionellen“ Assistenzsystemen (z. B. „Antiblockiersystem“, ABS) unterstützen Fahrerassistenzsysteme mit „maschineller“ Wahrnehmung Fahrer nicht nur in Situationen, die einfach zu messen sind, sondern helfen zudem durch den Einsatz „komplexer“ Signalverarbeitung. Diese zweite Komponente entspricht im Wesentlichen dem oben aufgeführten Kriterium der Informationsverarbeitung bzw. der Kategorisierung durch die unterstützten kognitiven Prozesses. Die Klassifikation anhand der vorliegenden Arbeitsteilung lässt sich nicht eindeutig einem von Vollrath und Krems aufgeführten Kriterium zuordnen und kann als ein weiteres Klassifikationsmerkmal diskutiert werden.

Die Bandbreite der unterschiedlichen Funktionalitäten spiegelt sich damit in der Vielfalt der verwendeten Beschreibungsdimensionen wider. Darüber hinaus fällt auf, dass sich der Großteil der Dimensionen zwar auf Aspekte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bezieht (z. B. Unterstützung der kognitiven Prozesse, unterstützte Teilfahraufgabe), ohne dass dabei jedoch die vom Fahrer zu bewältigenden Aufgabenanteile für die verschiedenen Systemgruppen beschrieben werden. Eine eindeutige Abgrenzung von Subgruppen und die Formulierung von Bewertungskriterien erweist sich auch mit den zusätzlichen Definitionen als schwierig.

Die von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vorgelegte Nomenklatur zur Klassifikation von Automatisierungsgraden (Gasser et al., 2012, siehe Tabelle 3) weist in diesem Zusammenhang verschiedene Vorteile auf, da sowohl Systemeigenschaften als auch die vom Fahrer zu leistenden Aufgaben betrachtet werden. Um verschiedene Systeme einer Klasse von Fahrfunktionen zuzuordnen, werden die vom System beeinflusste Komponente der Fahrzeugführung (Unterstützung der Quer- und/oder Längsführung) sowie die Dauer, mit der die Fahraufgabe unterstützt werden kann, verwendet. Darüber hinaus werden weitere Aspekte betrachtet, die die bisherigen Beurteilungsdimensionen ergänzen. Einerseits wird die Bedeutung der Überwachungsaufgabe durch den Fahrer unterstrichen. Die Automatisierungsgrade werden in Bezug auf die Notwendigkeit einer Überwachung durch den Fahrer (dauerhaft, nicht dauerhaft und überhaupt nicht) sowie anhand der notwendigen Übernahmebereitschaft (unmittelbar oder mit zeitlicher Reserve) kategorisiert. Andererseits wird die Fähigkeit des Systems zur Herstellung eines „risikominimalen Zustandes“ und damit einhergehend die notwendige Identifizierung von Systemgrenzen als Merkmal eingeführt.

Tabelle 3: Benennung und Klassifizierung automatischer Fahrfunktionen nach Gasser et al. (2012).

Nomenklatur	Beschreibung des Automatisierungsgrades und der Erwartung durch den Fahrer	Beispielhafte Systemausprägung
Driver Only	Der Fahrer führt dauerhaft / während der gesamten Fahrt die Längsführung (Beschleunigung / Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.	Kein in die Längs- oder Querführung eingreifendes (Fahrerassistenz-) System aktiv
Assistiert	<p>Der Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. • Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. 	<p><i>Adaptive Cruise Control:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Längsführung mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung <p><i>Parkassistent:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Querführung durch Parkassistenten (automatisches Lenken in Parklücken. Der Fahrer steuert die Längsführung.)
Teilautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für einen gewissen Zeitraum und / oder in spezifischen Situationen).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen. • Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein. 	<p><i>Autobahnassistent:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Automatische Längs- und Querführung • Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze • Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen und bei Übernahmeaufforderung sofort reagieren.

Hochautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen. • Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert. • Systemgrenzen werden vollständig vom System erkannt. Das System ist jedoch nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen. 	<p><i>Autobahn-Chauffeur:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Automatische Längs- und Querführung • Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze • Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und nach Übernahmeaufforderung muss mit gewisser Zeitreserve reagieren.
Vollautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen • Vor dem Verlassen des Anwendungsfalls fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf • Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt. • Systemgrenzen werden vollständig vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen. 	<p><i>Autobahnpilot:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Automatische Längs- und Querführung • Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze • Fahrer muss nicht überwachen • Reagiert der Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung, so bremst das Fahrzeug in den Stillstand herunter.

Für die Bewertung der Beherrschbarkeit von Fahrfunktionen bringt dieser Ansatz verschiedene Vorteile mit sich. Die konstante Verwendung abgrenzbarer Systemeigenschaften als Unterscheidungskriterien ermöglicht eine eindeutige Zuordnung unterschiedlichster Systeme. Da auch die Aufgaben des Fahrers

betrachtet und den jeweiligen Funktionen zugeordnet werden, ist eine direkte Operationalisierung einer erfolgreichen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion möglich. Für den Bereich der teilautomatisierten Systeme, deren Betrachtung den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ausmacht, kann von einer angemessenen Beherrschbarkeit ausgegangen werden, wenn Fahrer in der Lage sind, die Systemaktivität dauerhaft zu überwachen und zudem zu einer unmittelbaren Übernahme der Fahraufgabe fähig sind. Die Formulierung dieser Anforderungen ermöglicht damit einen experimentellen Zugang, um Aussagen über die Beherrschbarkeit der jeweiligen Systeme treffen zu können. Im Unterschied zu der von Vollrath und Kreamer herangezogenen Definition wird die Übersteuerbarkeit einer Funktion als ein zentrales Konzept der Beherrschbarkeit (siehe Kapitel 2.1) jedoch überhaupt nicht berücksichtigt. Die Fähigkeit des Fahrers automatische Eingriffe zu übersteuern sollte jedoch grundsätzlich für alle Automatisierungsgrade gewährleistet sein, sofern die zu übersteuernde Systemhandlung innerhalb der Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit liegt.

Das von Gasser et al. vorgeschlagene Klassifikationssystem erweist sich damit für die Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion an Systemgrenzen (z. B. Übernahmeszenarien) als vorteilhaft und soll im Folgenden verwendet werden. Die explizite Berücksichtigung von notwendigen Fahrerreaktionen und deren spezifische Zuordnung ermöglichen eine direkte Ableitung von Bewertungskriterien und deren Operationalisierung in experimentellen Untersuchungen. Darüber hinaus umfasst die BAST-Nomenklatur eine große Spannweite von Automatisierungsgraden und differenziert auch höhere Stufen deutlich. Insbesondere die Gliederung der Bereiche Teil-, Hoch- und Vollautomation gestattet eine getrennte Betrachtung von Funktionen, die über den Assistenzbereich hinausgehen und unter Umständen eigene Bewertungskriterien erfordern. Aussagen über den Umgang mit möglichen Systemfehlern, wie es Bewertungen der Beherrschbarkeit fordern, werden innerhalb dieser Definition jedoch nicht vorgenommen. Die Auseinandersetzung mit möglichen Fehlerbildern ist dennoch ein wichtiger Bestandteil in der Absicherung neuer Funktionen und erfordert ebenso spezifische Bewertungsansätze. Für den Bereich der Fahrerassistenz wurden bereits verschiedene Verfahren entwickelt und insbesondere auf querführende Systeme angewandt. Die hierbei verwendeten Beurteilungskriterien werden in Kapitel 2.6.3 näher beleuchtet und auf die Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei teilautomatisierten Systemen bezogen.

Die Bewertung von teilautomatisierten Systemen ist ein zentrales Anliegen der vorliegenden Arbeit. Die Entwicklung dieser Systeme stellt einen wahrscheinlichen Entwicklungsschritt in der Gestaltung zukünftiger Fahrfunktionen dar. Wie im Folgenden zu zeigen sein wird, kann davon ausgegangen werden, dass diese Systeme die Längs- und Querverführung durch eine einzelne Instanz beeinflussen. Die Integration von automatischen Eingriffen in die Quer- und Längsführung geht damit über den Funktionsumfang aktueller Assistenzsysteme hinaus. Im Folgenden sollen mögliche Ausprägungen teilautomatisierter Systeme und Unterschiede zu herkömmlichen Fahrerassistenzsystemen näher beschrieben werden.

2.1.2 Vernetzung und Integration von Assistenzfunktionen

Die technische Entwicklung der letzten Jahre ist auf dem Gebiet der Fahrerassistenz von einem stetig funktionalen Zuwachs gekennzeichnet. Standen am Anfang der Entwicklung vor allem elektronische

Hilfssysteme, die in kritischen Situationen kurzfristig korrigierende Eingriffe ohne weiteres Zutun des Fahrers leisteten (z. B. „Antiblockiersysteme“ ABS, „Antischlupfregelung“ ASR oder „Elektronisches Stabilitätsprogramm“, ESP) im Vordergrund, so sind heutige Systeme bereits in der Lage, auch komplexere Situationen zu erkennen, zu bewerten und geeignete Eingriffe auszuführen. Eingreifende Systeme beeinflussen aktiv die Fahraufgabe und stellen unter Gesichtspunkten der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion die meisten Anforderungen an den Fahrer. Da hier alle Prozesse der menschlichen Informationsverarbeitung betroffen sind (Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung, Aktionsentscheidung und Aktionsausführung) kann von umfangreichen Adaptionsvorgängen psychischer Prozesse ausgegangen werden (Popken, 2009, siehe Kapitel 2.4).

Assistenzsysteme, die die Fahrzeugführung aktiv beeinflussen, werden gegenwärtig sowohl für den niedrigen als auch für den höheren Geschwindigkeitsbereich angeboten. In beiden Einsatzbereichen beeinflussen aktuelle Systeme entweder die Quer- oder die Längsführung des Fahrzeugs. Im Bereich der Parkassistenten wird z. B. die Querführung durch die automatische Ausführung des Lenkvorgangs unterstützt, während der Fahrer die Längsführung durch Betätigung von Gas und Bremse eigenständig vornimmt (z. B. Volkswagen Parklenkassistent „Park Assist“). Für den höheren Geschwindigkeitsbereich stehen im Bereich der Querführung die bereits beschriebenen Heading Control Systeme zur Verfügung. Spurhalteassistenten erkennen hierbei die Fahrbahnmarkierungen und setzen die Vorgaben eines Spurführungsalgorithmus durch eine entsprechende Aktorik um. Je nach Parametrisierung des Systems können dabei Bahnführungskonzepte verwendet werden, die sich eher an der Spurmitte oder an den äußeren Spurbereichen orientieren. Systeme, die das Beschleunigungsverhalten von Fahrzeugen beeinflussen, sind ebenfalls für die Unterstützung verschiedener Situationen konzipiert. Kurzfristig können Fahrer bei der Ausführung von Bremsmanövern unterstützt werden, indem das Bremssystem in potentiell kritischen Situationen auf ein Bremsmanöver vorbereitet und dieses dann verstärkend ausführt. Der Kontext, in dem diese kurzfristigen Bremsmanöver unterstützt werden, hat sich dabei in den letzten Jahren zunehmend erweitert. Das Umfeld wird hierzu in der Regel radar- oder kamerabasiert überwacht. Die gleiche Sensorik und Aktorik verwenden längsführende Assistenzsysteme die für einen längeren Einsatzzeitraum konzipiert sind.

Die unter 2.1 beschriebenen Abstandsregelautomaten erkennen vorausfahrende Fahrzeuge und passen die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs so an, dass ein zuvor gewählter Abstand eingehalten wird. Wird kein vorausfahrendes Fahrzeug detektiert, hält dieses System eine definierte Wunschgeschwindigkeit, wie es von herkömmlichen Geschwindigkeitsregelanlagen bekannt ist. Alle zum gegenwärtigen Zeitpunkt erhältlichen Systeme beeinflussen entweder die Quer- oder die Längsführung des Fahrzeugs. Obwohl der parallele Einsatz eines quer- und eines längsführenden Systems möglich ist (z. B. die gleichzeitige Verwendung eines ACC- und Spurhaltesystems), werden hier beide Eingriffsdimensionen durch getrennte technische Instanzen beeinflusst. Umfangreichere Fahrmanöver, wie zum Beispiel das Einfädeln auf eine Autobahn, sind mit diesen Systemen nicht realisierbar.

Durch zukünftige Entwicklungen könnten diese Fahrmanöver jedoch möglich werden. Neue Funktionen des automatischen Fahrens scheinen insbesondere durch die Vernetzung bisheriger Einzelfunktionen gekennzeichnet zu sein. Diesen Schluss legen zumindest die Inhalte öffentlich geförderter

Kooperationsprojekte nahe, in denen prototypische Assistenzfunktionen in Zusammenarbeit von industriellen Partnern und wissenschaftlichen Institutionen entwickelt werden.

Auf nationaler Ebene treten mit dem UR:BAN-Projekt vor allem Bemühungen in den Vordergrund, Assistenzsysteme auch für den städtischen Bereich zu konzipieren (vgl. urban-online.org). Der urbane Raum kann aufgrund seiner Komplexität und Dynamik wesentlich höhere Anforderungen an die technischen Systeme und den Fahrer stellen. Im Bereich der eingreifenden Systeme scheinen zwei prototypische Entwicklungsansätze den oben angenommenen Trend der Vernetzung und Integration besonders zu stützen. Das Teilprojekt „Sichere Quer- und Längsführung in der Stadt“ beschäftigt sich mit der Unterstützung des Fahrers in städtischen Szenarien. Dazu gehören insbesondere Situationen, die Engstellen und Blockaden enthalten, auf die der Fahrer reagieren muss. Während ein Engstellenassistent im Wesentlichen die Unterstützung der Querführung adressiert, sieht der geplante „Spurwechselassistent mit Rundumsicht“ zumindest teilweise gleichzeitige Eingriffe in die Längsführung vor. Der Spurwechselassistent soll dabei die Ausführung eines Spurwechselmanövers unter Berücksichtigung der Fahrzeuge aller anderen Spuren ermöglichen. Als zweites neuartiges System zielt die Funktion „Kollisionsvermeidung durch Ausweichen und Bremsen“ auf die Vermeidung von Auffahrunfällen ab. Hierbei sollen entweder getrennte Lenk- und Bremsmanöver oder eine Kombination beider Eingriffsarten automatisch ausgeführt werden und dabei helfen, einen Unfall zu vermeiden. Auch diese Funktionalität geht über die bisherigen Umfänge von Fahrerassistenzsystemen hinaus, indem beide Eingriffsdimensionen (Längs- und Quereingriffe) durch eine zentrale Instanz gesteuert werden.

Werden beide Eingriffsdimensionen durch ein System beeinflusst, liegt mindesten eine teilautomatisierte Fahrfunktion vor (vgl. Kapitel 2.1.1). Die prototypische Umsetzung einer solchen Funktion war bereits Gegenstand des Aktiv-Projekts (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr, aktiv-online.org). Auch die Inhalte dieses Projekts zeichnen sich insgesamt durch die Vernetzung von Informationen und Einzelfunktionen zur Unterstützung des Fahrers aus.

Das Teilprojekt „Aktive Sicherheit“ untersuchte hierbei die Machbarkeit verschiedener Funktionen, die den Fahrer bei Gefahrenbremsungen, im Kreuzungsbereich und bei der Vermeidung von Kollisionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern unterstützen sollen. Innerhalb der Arbeiten um die „kontinuierliche Querführung“ wurden zudem Technologien untersucht, um den Fahrer in der Spurhaltung zu assistieren. Von besonderem Interesse waren hierbei potentiell beanspruchende Fahrsituationen, wie das Durchfahren einer Baustelle. Anders als in dem oben beschriebenen UR:BAN-Projekt wurden hier jedoch Autobahn- bzw. Landstraßenszenarien und damit höhere Geschwindigkeitsbereiche fokussiert. Eine prototypische Ausprägung dieser Funktionsgruppe umfasst die Integration einer automatisch ausgeführten Quer- und Längsführung und entspricht damit ebenso dem oben beschriebenen Trend der Verknüpfung von einzelnen Subfunktionen.

Eine Funktion dieser Art bildet die Grundlage der vorliegenden Arbeit und soll im Hinblick auf deren Beherrschbarkeit näher untersucht werden. Der Vorteil einer integrierten Quer- und Längsführung wird in den erweiterten fahrdynamischen Möglichkeiten gesehen (siehe Kapitel 2.5). So kann zum Beispiel neben der Spurhaltung auch die Geschwindigkeit während des Durchfahrens einer Baustelle automatisch

angepasst werden. Wie bereits im Zusammenhang mit den Aktivitäten des UR:BAN-Projekts geschildert, eröffnet sich auch die Möglichkeit, kurzfristige Lenk-Brems-Manöver im Rahmen von Ausweichmanövern auszuführen. Darüber hinaus ist eine Unterstützung des Fahrers in Kurven möglich, indem einerseits die notwendigen Eingriffe in die Querführung vorgenommen und andererseits die Geschwindigkeit verringert werden kann. Im Falle von engeren Straßenverhältnissen kann mit dieser Funktionalität zudem entgegenkommenden Fahrzeugen innerhalb des eigenen Fahrstreifens automatisch ausgewichen werden. Die innerhalb des Aktiv-Projekts umgesetzte prototypische Funktion erforderte dabei die Überwachung durch den Fahrer.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Integration einzelner Subfunktionen einen wesentlichen Aspekt zukünftiger Entwicklungen ausmachen wird. Die Integration der Quer- und Längsführung stellt dabei einen logischen Schritt in der Gestaltung neuer Fahrfunktionen dar. Indem komplexere Manöver automatisch ausgeführt werden, können Fahrer besser in potentiell beanspruchenden Situationen unterstützt werden. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass den komplexen Umweltbedingungen zunächst noch nicht mit umfassenden automatischen Lösungen begegnet werden kann. Da die Überwachung der Fahrfunktion zunächst eine erforderliche Aufgabe des Fahrers bleiben wird, werden zukünftige Funktionen wahrscheinlich als teilautomatisierte Systeme umgesetzt.

Die Analyse von Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion durch die Nutzung teilautomatisierter Systeme wurde innerhalb des Aktiv-Projekts durch den Bereich „Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit“ vorgenommen. Im Teilprojekt „Testmethoden im Entwicklungsprozess“ wurden Bewertungskonzepte entwickelt, die das Ziel haben, Aussagen über die Nutzerfreundlichkeit (Usability) und die Beherrschbarkeit (Controllability) neuer Funktionen zu ermöglichen. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse sind im Rahmen dieses Teilprojektes erarbeitet worden. Inwieweit eine integrierte Quer- und Längsführung veränderte Anforderungen an den Fahrer stellt, soll in den folgenden Kapiteln untersucht werden. Um einen Vergleich zwischen den herkömmlichen und neuen Fahreraufgaben zu ermöglichen, wird in einem ersten Schritt die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion während der manuellen Fahrt beschrieben.

2.2 Fahreraufgaben während manueller Fahrten

Nach Abendroth und Bruder (2009) werden zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion vor allem zwei Ansätze diskutiert. Ein von Bubb (2003) beschriebenes Konzept zielt vor allem auf eine Einteilung der Fahreraufgaben nach ihrer Bedeutung für die Erfüllung des Fahrtzwecks ab und unterscheidet primäre, sekundäre und tertiäre Tätigkeiten (Abendroth & Bruder, 2009). Aufgrund einer differenzierten Ausarbeitung und der Integration weiterer Verhaltensmodelle, wird im Folgenden ein Vorschlag von Donges (2009) zur Beschreibung des Zusammenspiels von Fahraufgabe und menschlicher Informationsverarbeitung erläutert.

Zur Beschreibung und Vorhersage des Fahrerverhaltens und den damit einhergehenden kognitiven Prozessen, wurden verschiedene Modelle entwickelt, die eine explizite Beteiligung von automatischen Fahrfunktionen zunächst ausklammern. Braess und Donges (2006) sowie Donges (2009) überführen

zwei dieser Ansätze in ein übergreifendes Modell (siehe Abbildung 1). Die Autoren schlagen eine Zuordnung der Kategorien menschlicher Tätigkeiten nach Rasmussen (1983, links in Abbildung 1) zu den hierarchisch angeordneten Fahraufgaben nach Donges (1982, rechts in Abbildung 1) vor. Ziel dieser Modellintegration ist zum einen ein verbessertes Verständnis der kognitiven Anforderungen, die aus unterschiedlichen Fahraufgaben resultieren. Zum anderen soll die Identifikation besonderer kognitiver Anforderungen die Ableitung von Unterstützungsbedarf ermöglichen.

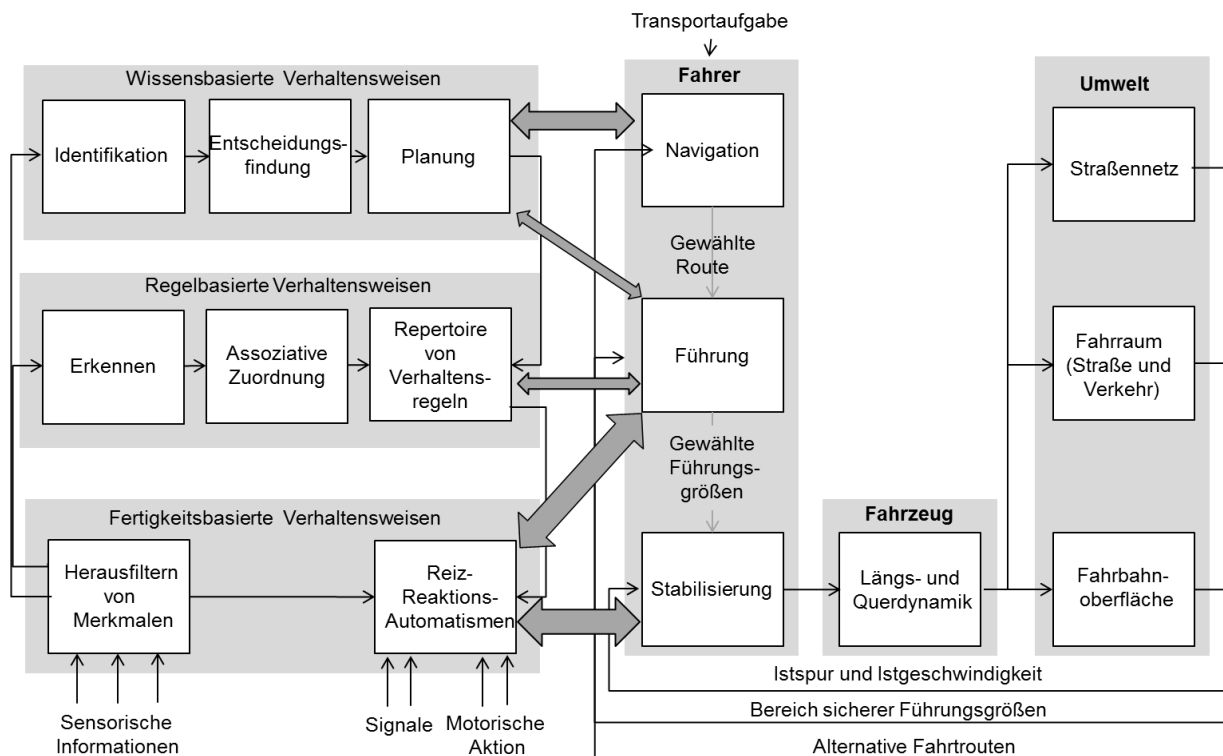


Abbildung 1: Integratives Modell der Kategorien zielgerichteter Tätigkeiten nach Rasmussen (1983, links) und der hierarchisch angeordneten Fahraufgaben nach Donges (1982, rechts) modifiziert nach Donges (2009).

Kern der Überlegungen von Rasmussen bilden drei Kategorien von zielgerichteten, sensumotorischen Tätigkeiten, mit denen unterschiedliche Anforderungen an die menschliche Informationsverarbeitung verbunden werden. Demnach erfordern komplexere oder unerwartete Situationen „wissensbasierte Verhaltensweisen“, die auf mentalen Modellen und bewussten Prozessen der Handlungsauswahl basieren. Während die wissensbasierte Ebene als Stufe mit den höchsten kognitiven Anforderungen konzipiert ist, verlieren bewusste Entscheidungsprozesse in den darunter liegenden Schichten an Bedeutung.

Bereits bekannte Situationen und bestehende Erfahrungen ermöglichen „regelbasierte Verhaltensweisen“, die die Anwendung bereits gelernter Verhaltensmuster gestatten und sich durch manifestierte Verhaltensweisen der wissensbasierten Ebene auszeichnen. Situationen mit sehr geringen Anforderungen an die menschliche Informationsverarbeitung kann mit „fertigkeitbasierten Verhaltensweisen“ begegnet werden, die in Rasmussens Modell als niedrigste Kategorie zielgerichteter Tätigkeiten angelegt sind. Verhaltensweisen dieser Stufe kommen ohne bewusste Kognitionen aus,

ermöglichen sehr schnelle Reaktionen als Teil etablierter Reiz-Reaktions-Ketten und bezeichnen „hochautomatisierte“ (Sub-) Routinen menschlichen Verhaltens.

Anders als das Konzept von Rasmussen bezieht sich die Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges (1982) auf die zur Erfüllung der Fahraufgabe notwendigen Teilaspekte (Stabilisierung, Führung und Navigation). Die erforderlichen Teilaufgaben werden dabei durch regelungstechnische Bezüge beschrieben. Aufgaben der Navigation beziehen sich hier vor allem auf die Routenauswahl, deren Aktualisierung und auf die Abschätzung des zeitlichen Aufwands der Fahraufgabe. In hoch vertrauten Verkehrsgebieten fallen Aufgaben dieser Art, den Überlegungen von Donges zufolge, nicht mehr an.

Die eigentlichen „dynamischen Prozessen des Fahrens“ verortet der Autor auf der Führungs- und Navigationsebene. Nach Donges besteht die Aufgabe der Fahrzeugführung „im Wesentlichen darin, die aus der vorausliegenden Verkehrssituation sowie aufgrund des geplanten Fahrtablaufs die als sinnvoll erachteten Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit abzuleiten und antizipatorisch im Sinne einer Steuerung (open loop control) einzugreifen, um günstige Vorbedingungen für möglichst geringe Abweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen zu schaffen“ (Donges, 2009: S. 16). Die Stabilisierungsebene des Modells umfasst vor allem korrigierende Stelleingriffe des Fahrers und zielt auf eine minimale Differenz der Regelabweichung zwischen Führungs- und Istgrößen.

Um einen Bezug zwischen den von Rasmussen entworfenen Tätigkeitskategorien und den Ebenen der Fahraufgabe herzustellen, beschreibt Donges im Folgenden einen Abgleich beider Modelle. Die Navigationsaufgabe wird hierbei eindeutig auf das wissensbasierte Verhalten bezogen, da insbesondere das Navigieren in unbekanntem Umfeld bewusste Denkprozesse und Entscheidungen erfordert. Eine ebenso klare Zuordnung wird zwischen Stabilisierungsaufgaben und den fertigkeitsbasierten Verhaltensweisen vorgenommen. Einschränkend wird hierbei allerdings die Fahrerfahrung als moderierender Faktor eingeführt. Während Fahranfänger selbst grundlegende Anteile der Fahraufgabe durch bewusste Entscheidungs- und Steuerungsprozesse bewältigen müssen, werden solche Tätigkeiten von geübten Fahrern in hohem Maße unbewusst ausgeführt.

Diese Überlegungen gelten in besonderem Maße auch für Aufgaben der Führungsebene. Liegen objektive Anforderung der Verkehrssituation oder die Fahrerfahrung des Fahrers auf mittlerem Niveau, kann die Fahrzeugsteuerung ohne weiteres durch fertigkeitsbasierte Verhaltensweisen bewerkstelligt werden. Im Falle unerwartet eintretender Ereignisse bzw. im Falle kritischer Bedingungen muss den veränderten Umweltbedingungen mit regelbasierten oder sogar mit wissensbasierten Verhaltensweisen begegnet werden. Der Nachteil von regelbasierten oder wissensbasierten Reaktionen wird hierbei in den erhöhten kognitiven Anforderungen und damit einhergehend in den verlängerten Reaktionszeiten gesehen.

Die Aufgaben des Fahrers während der manuellen Fahrt bestehen, den oben geschildert Überlegungen zufolge, aus der Stabilisierung, Führung und Navigation des Fahrzeugs. Die verschiedenen Aufgaben stellen in der Regel unterschiedliche kognitive Anforderungen an den Fahrer. Für durchschnittlich geübte Fahrer ist davon auszugehen, dass Aufgaben der Stabilisierungsebene weitgehend unbewusst und mit

niedrigem Ressourcenaufwand gelöst werden können. Gleichmaßen kann davon ausgegangen werden, dass Aufgaben der Navigation durch bewusste Entscheidungsprozesse bearbeitet werden müssen. Die Führungsebene stellt innerhalb der manuellen Fahrt einen Sonderfall dar, da hier einerseits das dynamische Fahrgeschehen bewältigt wird und andererseits, im Falle von erhöhten Anforderungen, auf komplexe und unbekannte Situationen mit wissensbasierten und damit langsamen Verhaltensweisen reagiert werden muss. Fertigungs- und regelbasierte Reaktionen können unter bestimmten Umständen nicht ausreichen, um den Umweltaforderungen zu begegnen. Potentiell kritische Situationen ergeben sich nach Donges dann, wenn aufgrund einer zu geringen Gefahrendistanz zu wenig Zeit für bewusste Entscheidungen über konkurrierende Handlungsalternativen vorliegt. Wie im Folgenden zu zeigen sein wird, besteht aus diesem Grund ein besonderer Unterstützungsbedarf für die Teilaufgabe der Fahrzeugführung (siehe Kapitel 2.5). Hier vorgenommene Bedieneingaben werden über die Stabilisierungsebene umgesetzt und beeinflussen damit die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs. Die manuelle Beeinflussung der Fahrzeugdynamik ist wiederum Voraussetzung zur Interaktion mit den Umweltfaktoren Straßennetz, Fahrraum und Fahrbahnoberfläche. Kommen automatisierte Fahrfunktionen zum Einsatz, wird dieser Prozess an verschiedenen Stellen unterbrochen und durch neue Aufgaben ergänzt.

2.3 Anforderungen teilautomatisierter Fahrfunktionen an den Fahrer

Mit der Verwendung von automatischen Fahrfunktionen ist ein weiterer Akteur an der Fahrzeugsteuerung beteiligt. Vollrath und Krems beschreiben die Rolle eines Assistenzsystems im System „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“, wie in Abbildung 2 dargestellt. Assistenzsysteme sind hierbei parallel zur Aufgabe des Fahrers angeordnet und erhalten mittels Sensorik Informationen aus der Umwelt, die bewertet und weiterverwendet werden. Zum einen sind aktive Eingriffe in die Fahraufgabe bzw. die Beeinflussung der Aktorik möglich. Zum anderen können relevante Informationen über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) mitgeteilt werden. Über die gleiche logische Einheit ist es dem Fahrer auch möglich, Bedienhandlungen vorzunehmen. Neben den Informationen über das Umfeld können zudem Informationen über das Fahrzeug an das Assistenzsystem übermittelt werden. Je nachdem, ob eine explizite Sensorik zur Erfassung des Fahrers eingesetzt wird, ist auch die Verwendung direkter oder indirekter Informationen über den Fahrer möglich.

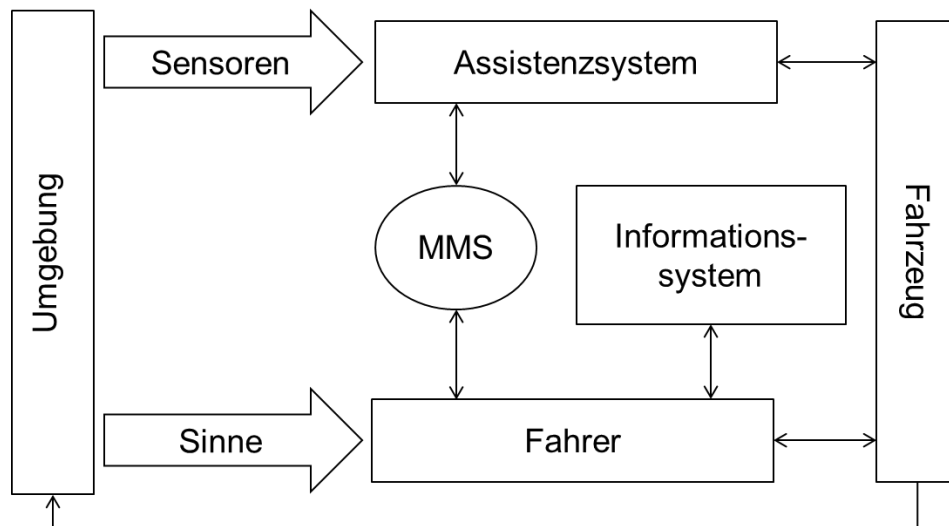


Abbildung 2: Fahrer-Fahrzeug-System unter Berücksichtigung eines Fahrerassistenzsystems nach Vollrath & Krems (2011).

Da aktuelle Assistenzsysteme im Wesentlichen auf der redundant-parallelen Arbeitsweise basieren, (vgl. Kapitel 2.1.1) werden die gleichen Aufgaben sowohl durch den Fahrer als auch durch das Assistenzsystem übernommen. Die Bedieneingaben des Fahrers und Eingriffe des Systems können daher in Wechselwirkung zueinander stehen und voneinander abhängig sein. Darüber hinaus verändert das Fahrzeug die Umweltsituation und hat somit Einfluss auf die Umgebung.

Werden diese Zusammenhänge auf das von Donges vorgeschlagene Konzept der Fahraufgaben bezogen, zeigen sich weitere Einflüsse auf das Fahrer-Fahrzeug-System. Abbildung 3 zeigt eine erweiterte Darstellung der Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges (2009) und berücksichtigt die Wirkung einer teilautomatisierten Fahrfunktion. Wie in Abbildung 2 dargestellt, sind auch hier die Bereiche „Fahrer“, „Fahrzeug“ und „Umwelt“ enthalten. Ergänzend dazu wird der Bereich „System“ dargestellt.

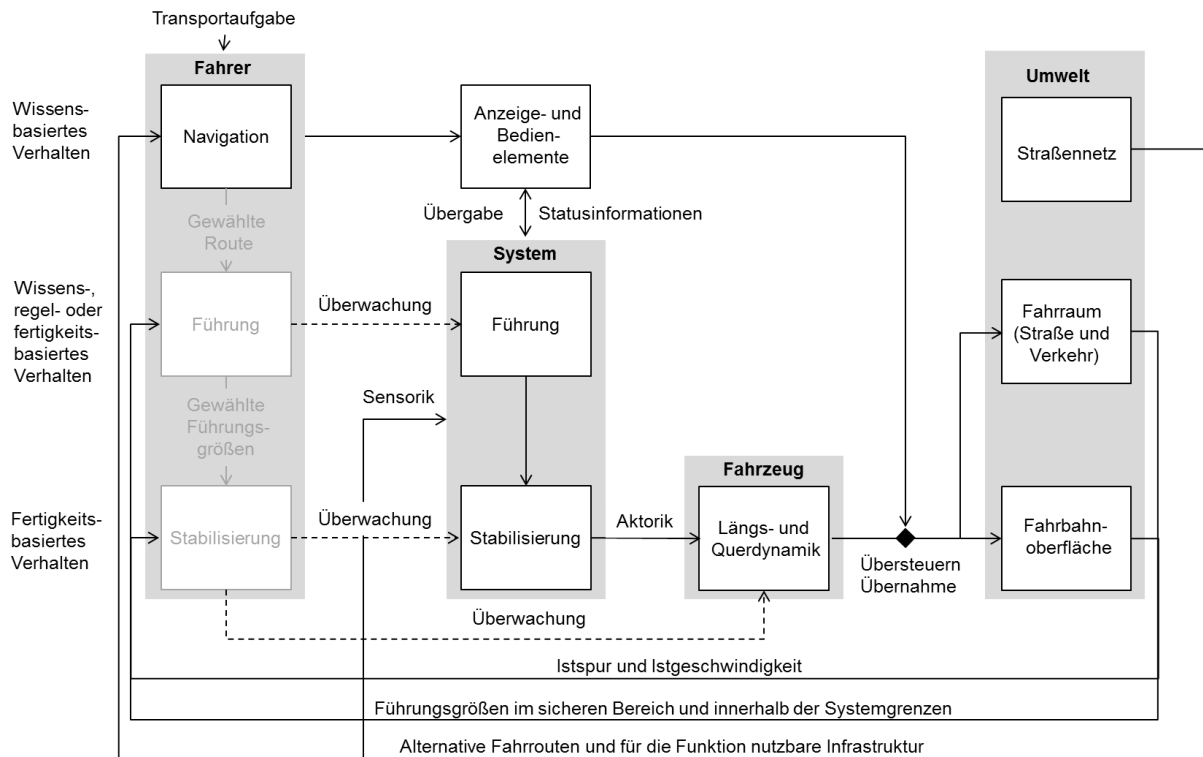


Abbildung 3: Erweiterte Darstellung der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges. Die Darstellung berücksichtigt die Wirkung einer teilautomatisierten Fahrfunktion.

Ein wesentlicher Unterschied zur manuellen Fahrt besteht in der Tatsache, dass die Bahnführung und die Stabilisierung des Fahrzeugs nicht mehr vom Fahrer, sondern durch die Fahrfunktion ausgeführt werden. Da teilautomatisierte Systeme per Definition nur für einen beschränkten Zeitraum oder nur für spezifische Situationen zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 2.1.1), kann nicht davon ausgegangen werden, dass die gesamte Fahrt automatisch ausgeführt wird. Die Navigationsaufgabe obliegt daher vollständig dem Fahrer.

Darüber hinaus muss der Fahrer die Funktion über entsprechende Anzeige- und Bedienelemente aktivieren und gegebenenfalls Einstellung vornehmen (in Abbildung 2 nach Vollrath und Krems „MMS“). Während der teilautomatisierten Fahrt stehen dem Fahrer die gewohnten Informationen über die Umwelt zur Verfügung. Das System erhält durch die Fahrzeugsensorik ebenfalls Informationen über die Umwelt, die ebenfalls alle Bereiche betreffen können. Obwohl systemseitig keine Navigationsaufgaben übernommen werden, können Daten über das Straßennetz verwendet werden, um festzustellen, ob die Infrastruktur die nötigen Betriebsvoraussetzungen erfüllt. Kann ein System zum Beispiel nur auf der Autobahn oder auf ausgebauten Landstraßen verwendet werden, ist die navigationsgestützte Identifikation geeigneter Straßen möglich. Können bestimmte Straßen nicht automatisch befahren werden, stellen sie eine Systemgrenze dar. Da aufgrund der Teilautomation kein automatisches Umfahren ungeeigneter Straßen möglich ist, sind auf Seiten des Systems der Aufgabenblock „Navigation“ und eine entsprechende Verbindung zu den Straßennetzinformationen nicht dargestellt.

Vollautomatische Systeme müssten hingegen durch den Navigationsblock charakterisiert und mit entsprechenden Verbindungen zu Straßennetzinformation versehen werden. Dies gilt allerdings nur insofern, als dass der definierte Anwendungsfall eine eigenständige Routenauswahl und deren

Befahrung vorsieht. Teilautomatisierte Systeme übernehmen hingegen die Führungsaufgabe des Fahrzeugs, indem sie die jeweilige Fahrsituation unter Verwendung relevanter Führungsgrößen bewerten und planen. Hierzu können zum Beispiel automatisch ausgeführte Einfädelmanöver oder das Durchfahren einer Baustelle zählen (vgl. Kapitel 2.1.2). Auf der Stabilisierungsebene werden die übergeordneten Ziele zudem durch aktorikgestützte Eingriffe in die Quer- und Längsführung umgesetzt.

Im Unterschied zur manuellen Fahrt muss die Ausführung dieser Aufgaben nicht vom Fahrer selbst vorgenommen, sondern dauerhaft überwacht werden. Dieser Bezug ist in Abbildung 3 durch die gestrichelten Pfeile zwischen den jeweiligen Aufgabenblöcken dargestellt. Im Falle einer voll- oder hochautomatisierten Fahrt würde hingegen eine vollständige Entkopplung vorliegen, da keine Überwachung notwendig ist. Die Überwachung der Führungsaufgabe beinhaltet den Abgleich zwischen dem vom Fahrer empfundenen Bereich sicherer Führungsgrößen und dem vom System bereitgestellten Bereich. Auf der Stabilisierungsebene müssen die systemseitigen Stelleingriffe mit den eigenen Handlungsplänen abgeglichen und bewertet werden. Tritt der Fall ein, dass der subjektiv empfundene Bereich sicherer Führungsgrößen überschritten wird, muss der Fahrer korrigierend eingreifen und die automatische Fahrfunktion übersteuern.

Da teilautomatische Funktionen sowohl die Quer- als auch die Längsführung beeinflussen, muss der Fahrer unter Umständen auf beide Eingriffsdimensionen gleichzeitig reagieren. Da gerade dieser Fahrbereich von Fahrern selten genutzt wird (siehe Kapitel 2.5) und somit geringe Erfahrungswerte vorausgesetzt werden können, sind wissensbasierte Reaktionen wahrscheinlich. Da diese Reaktionen für die dynamischen Anforderungen der Führungsebene eher ungünstig sind, muss den Auswirkungen von kombinierten Eingriffen in die Quer- und Längsführung mit besonderer Aufmerksamkeit begegnet werden.

Eine temporäre Übersteuerung der Fahrfunktion kann zudem so ausgelegt sein, dass sie eine komplette Deaktivierung des Systems zur Folge hat. Aktuelle ACC-Systeme werden beim Betätigen der Bremse sogar direkt, ohne weitere Zwischenschritte, deaktiviert. In diesem Fall muss der Fahrer die Fahraufgabe unmittelbar, ohne zeitliche Reserve, vollständig übernehmen. Die Notwendigkeit einer Übernahme, der zuvor automatisch ausgeführten Fahrfunktionen kann zudem aus weiteren Gründen erfolgen. Da teilautomatische Fahrfunktionen nur in spezifischen Situationen arbeiten, können die bereits oben angesprochenen Systemgrenzen eine Deaktivierung bewirken. Hierzu können zum Beispiel das Verlassen eines bestimmten Straßentyps oder die Abweichung von einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich zählen. Übernahmesituationen, die auf Ereignisse dieser Art zurückgehen, können zudem prädictierbar, mit einer bestimmten zeitlichen Reserve, ausgegeben werden, um den Fahrer vorzubereiten. In ungünstigeren Fällen entfällt diese zeitliche Reserve vollständig. Fälle dieser Art können auftreten, wenn Systemgrenzen unvorhersehbar erreicht werden, wie es zum Beispiel durch einen Verlust der Fahrbahnerkennung geschehen kann. Ebenso können plötzlich auftretende Defekte der Systemkomponenten eine unmittelbare Deaktivierung nach sich ziehen.

Neben systemseitigen Ursachen kommt auch der Fahrer als auslösende Instanz für eine Übernahmesituation in Betracht. Zum einen kann die Funktion auf Grund des Fahrerwunsches deaktiviert

werden. Zum anderen kann der Fall auftreten, dass der Fahrer den Betriebsvoraussetzungen nicht gerecht wird. Aktuelle Spurhaltesysteme verfügen zum Beispiel über eine „Hands-Off“-Detektion und können so feststellen, ob der Fahrer die Hände am Lenkrad hält. Wird kein Handkontakt festgestellt, deaktiviert sich das System mit einer zeitlichen Reserve. Darüber hinaus sind Komponenten denkbar, die den Fahrerzustand bewerten und z. B. im Falle einer zu geringen Vigilanz Fahraufgaben an den Fahrer zurückgeben. Da auch die Übernahme-situation im Kontext der Führungsaufgabe stattfindet, besteht auch hier die Möglichkeit, dass wissensbasierte Reaktionen eingesetzt werden müssen, um die Fahraufgabe erfolgreich zu übernehmen.

Damit zeigen sich für den Bereich der teilautomatisierten Fahrfunktionen im Wesentlichen vier neue Aufgabenfelder, die nicht während einer manuellen Fahrt auftreten:

1. Die Bedienung der Fahrfunktion, zu der die Aktivierung und Deaktivierung sowie gegebenenfalls notwendige Einstellungen relevanter Parameter (z. B. Warnzeitpunkte oder Eingriffsstärken) gehören. Diese Aufgabe unterscheidet sich nur unwesentlich von der Bedienung herkömmlicher Assistenz- und Informationssysteme und wird im Wesentlichen mit Kriterien der Bedienfreundlichkeit (Usability) sowie mit Fragen der Fahrerablenkung verknüpft. Wenngleich eine geringe Ablenkung während der Bedienvorgänge eine wichtige Voraussetzung für den angemessenen Einsatz von automatischen Fahrfunktionen ist, betreffen Fragen der Übersteuerung die Bewertung der Beherrschbarkeit stärker.
2. Die Übersteuerung, als zweite neue Aufgabe, ist keine reguläre Aufgabe des teilautomatisierten Fahrens, kann aber ein wichtiger Bestandteil der erfolgreichen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion sein. Aus dem Assistenzbereich ist diese Aufgabe bereits bekannt, ohne dass hier jedoch Eingriffsbilder vorliegen können, die gleichzeitig die Quer- und Längsführung betreffen. Inwieweit sich diese Eingriffsmuster von eindimensionalen Eingriffen in ihrer Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System unterscheiden, ist eine wesentliche Fragestellung der vorliegenden Arbeit und wird in Kapitel 5 näher beleuchtet.
3. Als dritter wichtiger Aspekt ist die vollständige Übernahme zuvor automatisch ausgeführter Fahraufgaben zu nennen. Auch diese Szenarien sind grundsätzlich aus dem Bereich der Fahrerassistenz bekannt, können aber durch die umfassenderen Eingriffe einer teilautomatischen Funktionen eine neue Qualität gewinnen. Aufgrund der gleichzeitigen Beeinflussung von Quer- und Längsführung können Übernahmen während der Ausführung komplexerer Manöver notwendig sein (z. B. Spurwechsel oder Ausweichmanöver).
4. Darüber hinaus kann die Überwachung eines quer- und längsführenden Systems andere Anforderungen an den Fahrer stellen als die Überwachung eines einzelnen Assistenzsystems, das nur eine Teilaufgabe ausführt. Diese vierte neue Aufgabe geht den Übernahme-situationen und der Übersteuerung ungewollter Eingriffe voraus und kann als Voraussetzung für die Fahrerreaktion verstanden werden.

2.4 Die Überwachung teilautomatisierter Fahrfunktionen

Die Nutzung automatischer Fahrfunktionen beinhaltet überwachende Fahreraufgaben, damit Fahrer im Fall von Ausfällen oder Fehlern angemessen in das Fahrgeschehen eingreifen können. Die partielle oder vollständige Entkopplung des Fahrers aus der direkten Fahraufgabe wird mit kognitiven, motivationalen und verhaltensbasierten Prozessen verbunden, die die tatsächliche Beteiligung bzw. Einbindung (Involvement) des Fahrers am Fahrgeschehen verändern (Popken, 2009). Hierbei wird davon ausgegangen, dass automatische Funktionen, die höhere kognitive Prozesse unterstützen, negative Auswirkungen auf die Fähigkeit zur Fehlerentdeckung haben können und es dem Fahrer erschweren, „im loop“ zu bleiben (Parasuraman & Wickens, 2008). Inwieweit sich zunehmende Automatisierung auf diese Prozesse auswirkt, ist von Popken (2009) am Beispiel der querführenden Assistenz untersucht worden. Als Grundlage der Analyse beschreibt die Autorin ein theoretisches Rahmenmodell, das das Zusammenspiel von Eigenschaften der Automation, Einstellungen des Nutzers, energetischen sowie motivationalen Prozessen und kognitiven Aspekten berücksichtigt (siehe Abbildung 4).

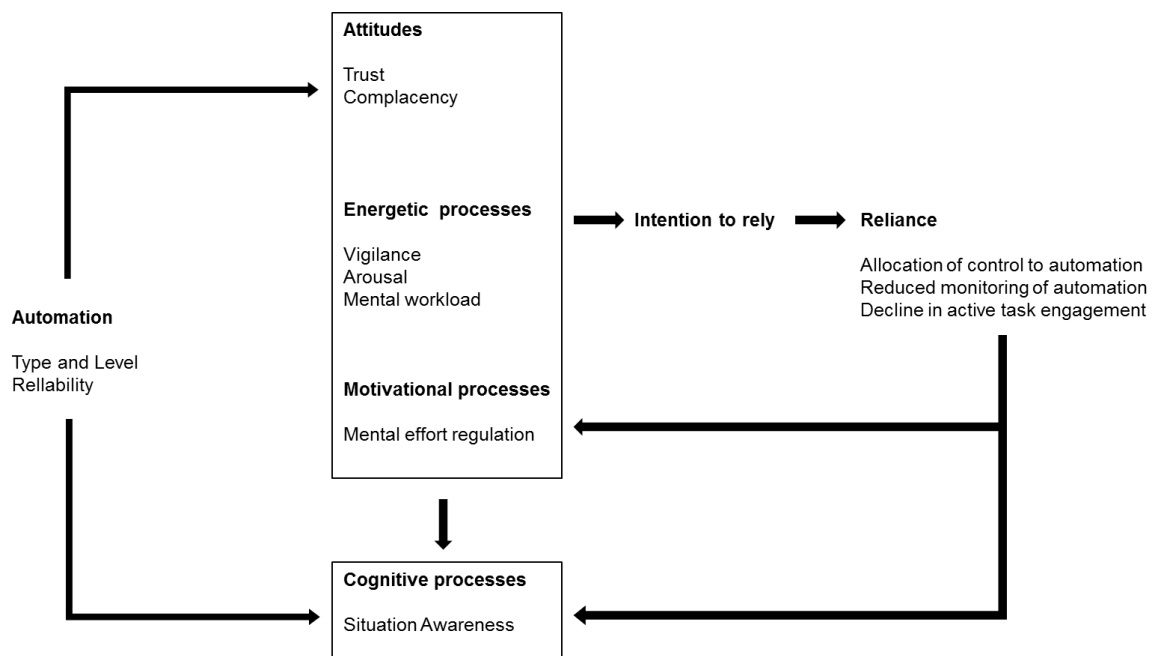


Abbildung 4: Der menschliche Adaptionsprozess in Abhängigkeit von der Automation (nach Popken, 2009, modifiziert). Das Verlassen auf die Automation (Reliance) und das Situationsbewusstsein (Situation Awareness) sind als zentrale Konzepte angelegt und beeinflussen maßgeblich den Interaktionsprozess.

Als zentrale Konzepte des Modells werden das „Verlassen auf eine Automation“ (Reliance) und das Situationsbewusstsein (Situation Awareness) beschrieben. Popken folgt in der Definition des Begriffs „Reliance“ den Überlegungen von Lee & See (2004), in dem das Verlassen auf ein System als „the deliberate act of allocating varying levels of control to an automated system“ (Popken, 2009: S. 35) beschrieben wird. Das Konzept des „Verlassens auf Automation“ wird dabei von dem „Vertrauen in Automation“ abgegrenzt, indem Verlassen als Verhalten und Vertrauen als eine Einstellung verstanden werden.

Das Verlassen auf eine Automation beschreibt Popken nach Parasuraman & Riley (1997) als ein Kontinuum, das durch die Pole „misuse“ (falsche Anwendung) und „disuse“ (Nichtanwendung)

gekennzeichnet ist. Beide Extrema beschreiben ein unangebrachtes Verlassen auf das System. Die falsche Anwendung (misuse) beinhaltet diesen Überlegungen zufolge ein zu hohes Maß an Verlassen auf die Automation, während die „Nichtanwendung“ eine zu geringe Ausprägung beinhaltet. Der „Disuse“-Fall liegt dann vor, wenn Systeme z.B. auf Grund zu geringer Akzeptanz sehr wenig oder gar nicht eingesetzt werden, obwohl deren Verwendung potentielle Vorteile mit sich bringen würde.

Demgegenüber wird die fälschliche Anwendung durch ein zu starkes Verlassen (Overreliance) beschrieben und ist durch eine unkritische Nutzung sowie durch ein Übermaß an Vertrauen gekennzeichnet. Overreliance-Effekte beinhalten die Vernachlässigung der Überwachungsaufgabe und äußern sich zudem in einer schlechteren Wahrnehmung von Systemgrenzen oder Fehlern. Darüber hinaus manifestiert sich ein verstärktes Verlassen auf ein automatisches System in einer geringeren aktiven Beteiligung an dem von der Automation unterstützten Prozess und in einer vermindert wahrgenommen Verantwortung an der Gesamtaufgabe (Popken, 2009).

Eine zentrale Annahme des Modells geht zudem davon aus, dass die Höhe der Automationsstufe, bzw. das Ausmaß, in dem die Fahraufgabe nicht mehr aktiv selbst ausgeführt wird, die Höhe des Verlassens entscheidend beeinflusst. Werden z. B. Aspekte der Handlungsausführung durch höhere Automationsstufen ausgeführt, sind diesen Überlegungen zufolge ebenso starke Tendenzen des Verlassens zu beobachten, wie sie bei sehr zuverlässigen Systemen auftreten. Dabei hat sich eine hohe technische Zuverlässigkeit als starker Prädiktor für verschiedene unerwünschte Verhaltensweisen in der Überwachung automatischer Systeme erwiesen (Parasuraman et al., 1996). Die von Popken formulierte Hypothese basiert dabei auf der Annahme, dass sowohl eine hohe Systemzuverlässigkeit als auch ein hoher Grad an Automatisierung die subjektiv wahrgenommene Notwendigkeit zur aktiven Teilnahme am Fahrgeschehen verringert.

Für den Bereich der teilautomatisierten Fahrfunktion ergeben sich damit verschiedene Fragestellungen, die die Fähigkeit des Fahrers betreffen, die automatisch ausgeführte Fahrzeugführung zu übersteuern oder unmittelbar zu übernehmen. Teilautomatisierte Systeme zeichnen sich, gemessen am gesamten Spektrum der möglichen Fahrzeugautomatisierung, nur durch einen mittleren Automatisierungsgrad aus (vgl. Kapitel 2.1.1). Werden jedoch Aspekte der Informationsverarbeitung als Maßstab herangezogen, zeigt sich, dass bereits teilautomatisierte Systeme umfassend in die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eingreifen, indem die Handlungsausführung durch kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung vorgenommen werden. Wird den oben beschriebenen Überlegungen gefolgt, sind unangemessene Verlassenseffekte damit grundsätzlich möglich. Da die Überwachung der Fahrfunktion auf der einen Seite eine entscheidende Voraussetzung für die Nutzung teilautomatisierter Systeme ist (vgl. Kapitel 2.3), auf der anderen Seite jedoch durch die Nutzung desselbigen Systems vermindert werden könnte, sollte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei der Nutzung teilautomatisierter Systeme mit besonderer Aufmerksamkeit begegnet werden. Da teilautomatisierte Systeme zudem umfassender in die Handlungsausführung eingreifen als es aktuelle Assistenzsysteme tun (vgl. Kapitel 2.1.2), muss unter theoretischen Gesichtspunkten von stärkeren Reliance-Effekten ausgegangen werden.

Auf psychischer Ebene kann das Situationsbewusstsein als zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Fahrer-Fahrerzeug-Interaktion gesehen werden. Das von Popken vorgeschlagene Modell unterstreicht die Bedeutung eines angemessenen Situationsbewusstseins, indem diese Modellkomponente durch alle übrigen Faktoren beeinflusst wird, ohne dass ausgehende Verbindungen beschrieben werden. Entsprechend dieser Überlegungen kann davon ausgegangen werden, dass ein angemessenes Situationsbewusstsein eine wesentliche Bedingung für die erfolgreiche Überwachungsaufgabe des Fahrers ist. Da die Überwachungsaufgabe wiederum als zentrale Voraussetzung für die Identifizierung und den Umgang mit Systemgrenzen und -fehlern gesehen wird, kann ein angemessenes Situationsbewusstsein als entscheidende Determinante der Beherrschbarkeit automatischer Fahrfunktionen gesehen werden. Für den Bereich der teilautomatischen Fahrfunktionen kann das bereits oben beschriebene Dilemma der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion damit auf das Situationsbewusstsein bezogen werden. Ein angemessenes Situationsbewusstsein ist auf der einen Seite Voraussetzung für die Nutzung teilautomatisierter Systeme, kann aber auf der anderen Seite durch die Nutzung dieser Funktionen beeinträchtigt werden. Auf die Frage, inwieweit solche Zusammenhänge für den Bereich der teilautomatisierten Systeme bekannt sind und auftreten können, soll im Anschluss an die folgende Begriffsklärung eingegangen werden.

2.4.1 Konzepte des Situationsbewusstseins

Das Konzept des Situationsbewusstseins ist eng mit der fortschreitenden Automatisierung in der Luftfahrt verknüpft und wurde erst im Laufe der Forschungsentwicklung auf weitere Bereiche übertragen. Stanton et al. (2001) und Gilson (1995) verorten die erste Auseinandersetzung mit Aspekten des Situationsbewusstseins sogar auf einen Zeitpunkt der militärischen Luftfahrt, zu dem aus heutiger Sicht gar keine Automatisierung vorhanden war. Die Autoren beziehen sich dabei auf einen Ausspruch von Oswald Boelke und dessen Aussage, dass „the importance of gaining an awareness of the enemy before the enemy gained a similar awareness, [...]“ (Stanton et al., 2001: S. 2) eine wesentliche Bedingung des erfolgreichen Luftkampfes sei. Obwohl die erste Auseinandersetzung mit der menschlichen Fähigkeit zum situativen Verständnis damit bereits auf die Anfänge des 20. Jahrhunderts zurückgehen würde, findet die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit diesem Thema jedoch erst wieder seit ca. 25 Jahren statt (Vollrath & Krems 2011, Rauch, 2009). Der wissenschaftliche Diskurs dieser Zeit spiegelt nach einhelliger Ansicht die zunehmende Entwicklung technisch komplexer Systeme auf der einen Seite und das menschliche Unvermögen damit angemessen umzugehen auf der anderen Seite wider. Die Auslegung von Systemen, die Piloten und dem Personal der Luftraumüberwachung helfen sollten, den erhöhten Anforderungen dieser Zeit zu begegnen, überstiegen häufig deren Fähigkeiten (Stanton et al., 2001).

Als bekanntester Ansatz zur Beschreibung der kognitiven Vorgänge, die zur Erstellung und Aufrechterhaltung eines angemessenen Situationsbewusstseins nötig sind, gilt eine von Endsley (1988) vorgelegte Definition. Endsley beschreibt Situationsbewusstsein als „[...] the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future“ (Endsley, 1988, S. 792). Diese Definition beschreibt die drei verschiedenen Stufen (Level) des Situationsbewusstseins, in denen

1. die wesentlichen Elemente einer Situation wahrgenommen werden,
2. die Situation verstanden wird, indem die Elemente und ihre Bedeutung in einen angemessenen Zusammenhang gestellt werden und
3. die zukünftige Entwicklung der Situation vorhergesagt wird.

Der von Endsley vorgeschlagene Ansatz versteht die verschiedenen Level des Situationsbewusstseins als Zustände bzw. Produkte und fokussiert Prozesse der Informationsverarbeitung sowie der Handlungsauswahl und deren Ausführung (siehe Abbildung 5). Da hier im Wesentlichen die kognitiven Prozesse und weniger situative Determinanten des Situationsbewusstseins betrachtet werden, handelt es sich um einen operatorfokussierten Definitionsansatz (Rauch, 2009, nach Durso und Gronlund, 1999).

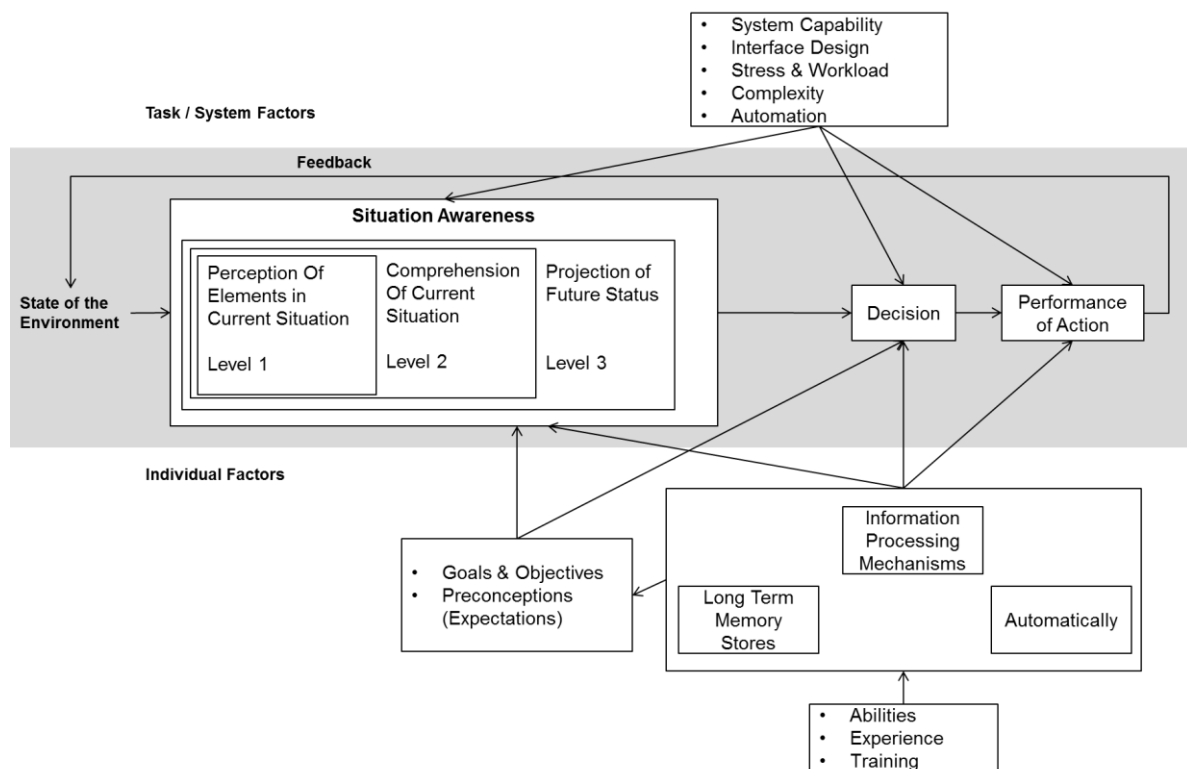


Abbildung 5: Situationsbewusstsein und menschliche Informationsverarbeitung nach Endsley (1995b, modifiziert).

Rauch (2009) identifiziert neben dem klassischen Ansatz von Endsley zwei weitere Theoriefamilien, die zwar in Teilen auf das von Endsley vorgeschlagene Konzept zurückgehen, jedoch noch weitere Facetten des Situationsbewusstseins beleuchten.

Smith und Hancock (1995) verstehen das Situationsbewusstsein als eine Adaptationsleistung und beschreiben einen „Risk Space“, mit dem zielgerichtetes Verhalten erklärt werden soll. Dieser Ansatz betont insbesondere die Umweltbedingungen als Faktoren, die das menschliche Verhalten bestimmen und nur bestimmte Reaktionen möglich machen. In Abbildung 6 ist ein Risk Space (nach Smith und Hancock, 1995) für den Bereich der Luftfahrt dargestellt. Hierbei zeigen die Autoren auf, welche Verhaltensweisen in Abhängigkeit des Abstandes und der Relativgeschwindigkeit zu anderen Flugzeugen ausgeführt werden sollten, um die Kollision mit anderen Flugzeugen zu vermeiden. Im Unterschied zu der von Endsley vorgelegten Definition handelt es sich hierbei um einen

situationsfokussierten Ansatz. Der Vorteil dieses Ansatzes wird in der klaren Operationalisierung des Situationsbewusstseins gesehen (Rauch, 2009). Psychische Prozesse, die zur Bildung und Aufrechterhaltung des Situationsbewusstseins notwendig sind, werden hierbei allerdings weniger betrachtet.

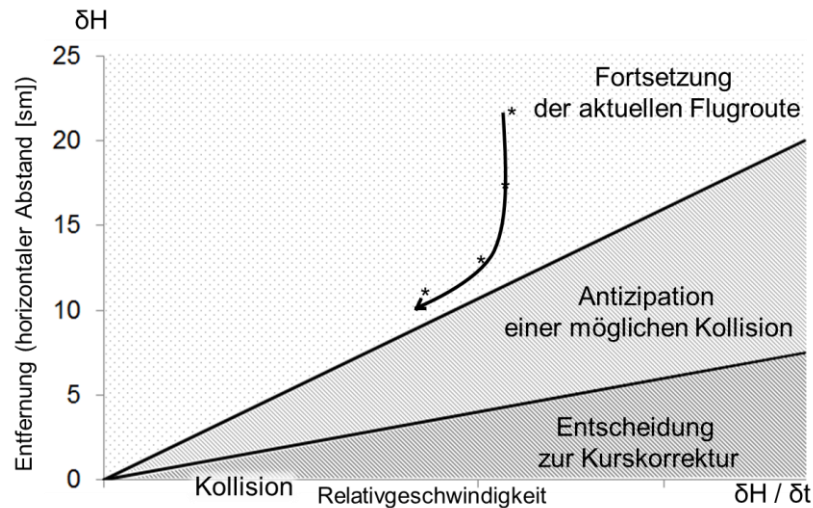


Abbildung 6: Modifizierter „Risk Space“ nach Smith & Hancock (1995) zur Beschreibung menschlicher Handlungsmöglichkeiten in Abhängigkeit situativer Umweltfaktoren.

Nach Adams, Tenny & Pew (1995) beinhaltet das Situationsbewusstsein, wie in dem von Endsley vorgeschlagenem Ansatz, das Wissen über die gegenwärtige Situation. Darüber hinaus gehen die Autoren jedoch von einer kontinuierlichen Aktualisierung dieses Wissens durch die Interaktion zwischen Nutzer und Umwelt aus. Dieser Prozess geht auf den von Neisser (1976) formulierten Wahrnehmungszyklus zurück und beinhaltet die Elemente „perceived environment“, „memory schema“ sowie „active exploration“ und beschreibt einen handlungsgesteuerten Prozess, der aus einer aktiven Informationssuche und Aufmerksamkeitssteuerung besteht (Rauch, 2009).

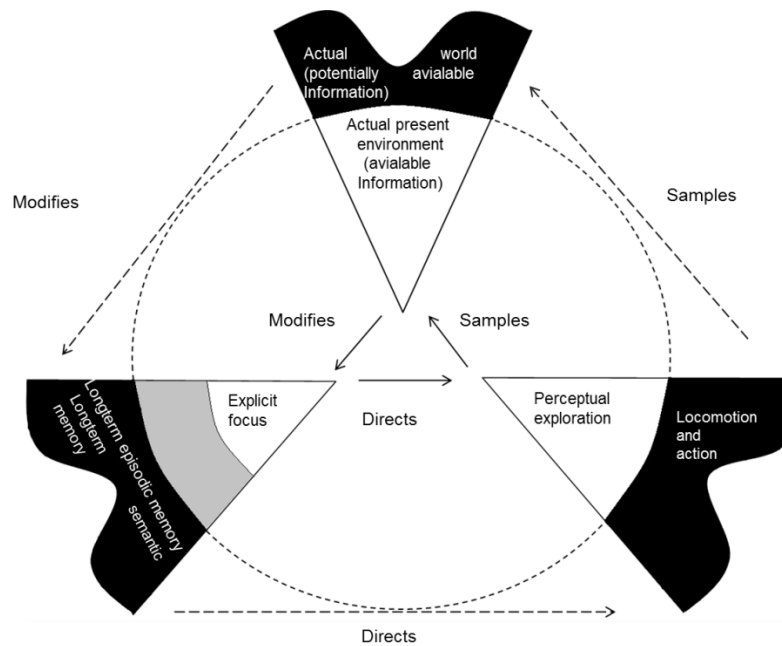


Abbildung 7: Zustand und Prozesse des Situationsbewusstseins im „perceptual cycle“ nach Adams et al. (1995, modifiziert).

Dieser Ansatz ist mit verschiedenen Vorteilen verbunden. Die Betonung der Interaktion zwischen Nutzer und Umwelt und die Anordnung der Prozesse innerhalb eines Zyklus lösen die hierarchische Abfolge des Endsley-Modells auf. Jeder Schritt des oben beschriebenen Kreislaufs kann damit Ausgangspunkt für die Bildung des Situationsbewusstseins sein (Rauch, 2009) und bildet die komplexen Interaktionsprozesse zwischen Mensch und Maschine damit vermutlich besser ab. Des Weiteren fließen sowohl Prozesse als auch Zustände in das Zustandekommen des Situationsbewusstseins ein. Eine konzeptuelle Trennung der naturgemäß verbundenen Interaktionsaspekte wird hier nicht mehr vorgenommen. Auch Popken (2009) zieht die Verwendung des von Adams, Tenny und Pew formulierten Ansatzes vor und bezieht sich in ihren Überlegungen auf die von Sarter & Woods (1991) vorgelegte Definition. Situationsbewusstsein wird darin als „*the accesssibility of a comprehensive and coherent situation representation which is continuously being updated in a accordance with the results of recurrent assessments*“ (Sarter & Woods, 1991, S. 52, zitiert nach Popken, 2009, S. 66) verstanden. Diesem Ansatz soll auch in der vorliegenden Arbeit gefolgt werden, da die oben genannten Vorteile des interaktionszentrierten Ansatzes auf ein besseres Verständnis der beteiligten Prozesse hindeuten.

2.4.2 Auswirkungen teilautomatischer Fahrfunktionen auf das Situationsbewusstsein

Die Bildung und Aufrechterhaltung eines angemessenen Situationsbewusstseins ist insbesondere unter Berücksichtigung der oben genannten Interaktion von Umwelt und Person von einem erfolgreichen Zusammenspiel der „Top-Down“- und „Bottom-Up“-Prozesse abhängig (Vollrath & Krems, 2011). Popken (2009) unterstreicht die Notwendigkeit beider Prozesse durch Beispiele von Nilsson (2005). Für den Bereich der „Top-Down“-Verarbeitung beschreibt Nilsson zweierlei Anforderungen an den Fahrer. Einerseits müssen Fahrer wissen, „wo und wann“ relevante Informationen herangezogen werden sollten, um die Fahraufgabe erfolgreich zu erfüllen. Andererseits ist es von entscheidender Bedeutung, dass Fahrer in der Lage sind, die wesentlichen Informationen von unwichtigen Informationen zu unterscheiden. „Bottom-Up“-Prozesse werden nach Nilsson hingegen besonders bei der Aktualisierung

des gewonnen Situationsverständnisses wichtig, da Fahrer auch auf unerwartete Situationen reagieren und ihre Handlungspläne anpassen müssen. Vor dem Hintergrund möglicher Übernahmen und Übersteuerungen teilautomatischer Eingriffe stellt sich für beide Arten der Informationsverarbeitung die Frage, inwieweit sie durch Nutzung einer solchen Funktion begünstigt oder beeinträchtigt werden.

Für die allgemeine Nutzung automatischer Fahrfunktionen werden sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf das Situationsbewusstsein diskutiert. Vollrath & Krems (2011) beschreiben auf der einen Seite ein verbessertes Situationsbewusstsein durch eine verringerte Fahrerbeanspruchung bei der Nutzung automatischer Fahrfunktionen. Befunde dieser Art werden unter anderem auf Vortac et al. (1993) zurückgeführt. Popken verweist in diesem Zusammenhang auf Arbeiten von Endsley & Kaber (1999). Auf der anderen Seite müssen jedoch ebenso Arbeiten zur Kenntnis genommen werden, die ein vermindertes Situationsbewusstsein feststellen und diese Effekte auf geringere Vigilanz und auf veränderte motivationale sowie kognitive Prozesse zurückführen.

Der von Popken erarbeitete theoretische Bezugsrahmen (vgl. Abbildung 4) lässt für den Bereich der teilautomatischen Fahrfunktionen verschiedene Schlüsse zu. Sofern den Grundannahmen dieses Modells gefolgt wird, können für den Bereich der teilautomatisierten Systeme stärkere Reliance-Effekte angenommen werden als für gängige Assistenzsysteme der Fall ist, da höhere Automatisierungsgrade vorliegen. Ein starkes Verlassen auf technische Systeme wird hierbei wiederum mit negativen Vigilanzeffekten in Verbindung gebracht (Endsley, 1996), sodass ein herabgesetztes Situationsbewusstsein auftreten kann. Da ein angemessenes Situationsbewusstsein als wesentliche Voraussetzung der Überwachungstätigkeit des Fahrers und damit als Voraussetzung für erfolgreiche Übernahmen und Übersteuerungen angesehen werden kann (vgl. Kapitel 2.4), ist eine genauere Betrachtung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in diesen Zuständen wichtig. Popken betont hierbei jedoch, dass der Zusammenhang zwischen Vigilanz und der Nutzung automatischer Systeme zwar weitgehend akzeptiert, aber nur unzureichend belegt ist. Vor diesem Hintergrund erscheint eine experimentelle Analyse der Übernahmen und Übersteuerungen von teilautomatischen Fahrfunktionen als besonders relevant.

Mit Bezug auf die kognitiven Auswirkungen der Überwachungsaufgabe entwirft Popken zwei wesentliche Argumentationslinien. Zum einen wird davon ausgegangen, dass höher automatisierte Funktionen die Anforderungen an die menschliche Informationsverarbeitung verändern, indem bestimmte Aufgabenteile (z. B. Informationsaufnahme und -analyse) automatisch ausgeführt werden. Durch diese veränderte Aufgabenstruktur wird der Wert bestimmter Umweltinformationen geringer, sodass hierfür weniger Aufmerksamkeitsressourcen zur Verfügung gestellt werden. Die Folge dieser veränderten Ressourcenverteilung sieht Popken letztlich in veränderten „Bottom-Up“-Prozessen, die unter Umständen in einer schlechteren Wahrnehmung von unerwarteten Situationen resultieren können. Die Ergebnisse einer Arbeit von Hoc et al. (2006), in der diese Fragestellung am Beispiel einer längsführenden Assistenz untersucht wurde, deuten auf die Existenz solcher Effekte hin. Die Autoren konnten in einer Simulatorstudie zeigen, dass Informationen, die für die Ausführung der Querverführung benötigt werden, weniger erfolgreich verarbeitet werden, wenn der entsprechende Teil der Fahraufgabe automatisiert ausgeführt wurde.

Werden diese Überlegungen auf die Funktionsweise einer kontinuierlich unterstützenden Teilautomation bezogen, können ebenso spezifische Auswirkungen auf die Informationsverarbeitung angenommen werden. Da hier sowohl die Quer- als auch die Längsführung automatisch ausgeführt werden, besteht die Möglichkeit, dass sowohl Spurführungs- als auch Abstandsinformationen weniger Gewichtung beigemessen werden. Im Falle von unmittelbaren Übernahmen kann sich diese veränderte Informationsverarbeitung nachteilig auf die Fahrerreaktion auswirken, sodass notwendige Eingriffe durch den Fahrer gar nicht oder erst zu spät ausgeführt werden. Inwieweit solche kognitiven Effekte vorliegen und sich diese Effekte zudem auch im Verhalten niederschlagen, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt unklar.

Zum anderen bezieht sich Popken in ihrer Argumentation auf handlungstheoretische Konzepte und verweist auf das „Extended Control Model“ (ECOM), das die Aufgabe der Fahrzeugführung durch das Ineinandergreifen von vier Kontrollschleifen („Loops“) erklärt (z. B. Hollnagel & Woods, 2005). Das ECOM-Konzept sieht dabei vor, dass diese Loops sowohl kompensatorische als auch antizipatorische Verhaltensweisen beeinflussen. Das Konzept beschreibt des Weiteren, dass das Ergebnis höherer Loops den Eingang für darunterliegende Schleifen bietet. Darüber hinaus fließt das Ergebnis aus niedrigeren Kontrollschleifen wiederum in die Zielsetzung des nächst höheren Loops ein, sodass eine vollständige Feedbackschleife gegeben ist. Der Zusammenhang zu den Auswirkungen automatischer Fahrfunktionen wird hergestellt, indem davon ausgegangen wird, dass z. B. kontinuierlich eingreifende Assistenzsysteme den Inhalt niedrigerer Loops übernehmen. Da diese „Entkoppelung“ wesentliche Eingangsgrößen aus dem Gesamtprozess entfernt, wird von einer erschwerten Kontrolle höherer kognitiver Schleifen ausgegangen.

Für teilautomatisierte Fahrfunktionen stellt sich hierbei erneut die Frage, inwieweit die Prozesse der „Bottom-Up“-Verarbeitung beeinflusst werden. Da beide Eingriffsdimensionen der automatischen Steuerung unterliegen, werden erhebliche Anteile der basalen Kontrollschleifen aus der Handlungsregulation entfernt. Gegebenenfalls notwendige Korrekturen durch den Fahrer würden diesen Überlegungen zufolge deutlich erschwert werden.

Für den Bereich der teilautomatischen Fahrfunktionen und das damit einhergehende Situationsbewusstsein bleibt damit insgesamt ein inkonsistentes Bild bestehen. Einerseits muss davon ausgegangen werden, dass die Unterstützung der Quer- und Längsführung besonders positive Effekte auf die Beanspruchung zeigt und damit Fahrern ein besonders gutes Situationsbewusstsein ermöglicht. Die Entlastung durch teilautomatische Funktionen müsste aufgrund ihrer „umfassenden“ Eingriffsart die Vorteile klassischer Assistenzsysteme übersteigen. Da die Überwachung der Fahrfunktion und damit das Situationsbewusstsein eine besonders wichtige Voraussetzung des teilautomatisierten Fahrens ist, deutet die Befundlage somit auf eine problemlose Fahrer-Fahrzeug-Interaktion hin.

Gerade weil ein angemessenes Situationsbewusstsein jedoch von solch besonderer Bedeutung für die erfolgreiche Nutzung der Funktion ist, müssen auch die möglichen negativen Effekte berücksichtigt werden. Neben den Auswirkungen auf die Vigilanz erscheinen insbesondere mögliche kognitive Effekte,

die die unmittelbare Übernahmefähigkeit des Fahrers einschränken, als relevant. Auswirkungen dieser Art lassen sich aus Überlegungen herleiten, die sich auf die Entkopplung basaler Kontrollebenen aus der Handlungsregulation beziehen. Diese Befunde weisen insgesamt darauf hin, dass die Nutzung teilautomatisierter Fahrfunktionen das Situationsbewusstsein einschränken und damit selbst die Voraussetzung des eigenen Betriebs verschlechtern kann.

Dieses potentielle Dilemma legt eine genauere Betrachtung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei der Nutzung teilautomatisierter Systeme nahe. Neben dem potentiell eingeschränkten Situationsbewusstsein sprechen jedoch noch weitere Überlegungen für eine Analyse der Interaktionsprozesse. Diese Überlegungen beziehen sich auf die Übersteuerbarkeit von teilautomatisierten Funktionen und sollen im Folgenden geschildert werden.

2.5 Die Übersteuerung teilautomatisierter Fahrfunktionen

Teilautomatisierte Fahrfunktionen sind in der Lage, die Quer- und Längsführung eines Fahrzeugs für eine gewisse Zeit, oder in spezifischen Verkehrssituationen, zu beeinflussen. Die automatische Ausführung solcher Eingriffe stellt eine sinnvolle Unterstützung des Fahrers dar und unterscheidet sich von den Möglichkeiten herkömmlicher Assistenzsysteme. Donges bezieht sich in Zusammenhang mit den oben geschilderten Überlegungen (vgl. Kapitel 2.1) auf eine Untersuchung von Wegscheider & Prokop (2005). Hierbei werden die auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen von 12 Probanden beispielhaft für das übliche Fahrgeschehen in öffentlichen Verkehrssituationen herangezogen. Die in Abbildung 8a dargestellte Form zeigt den Beschleunigungsbereich, in dem sich alle Fahrer zu 85% der Fahrzeit bewegten (85%-iges Perzentil einer 2,5-stündigen-Fahrt).

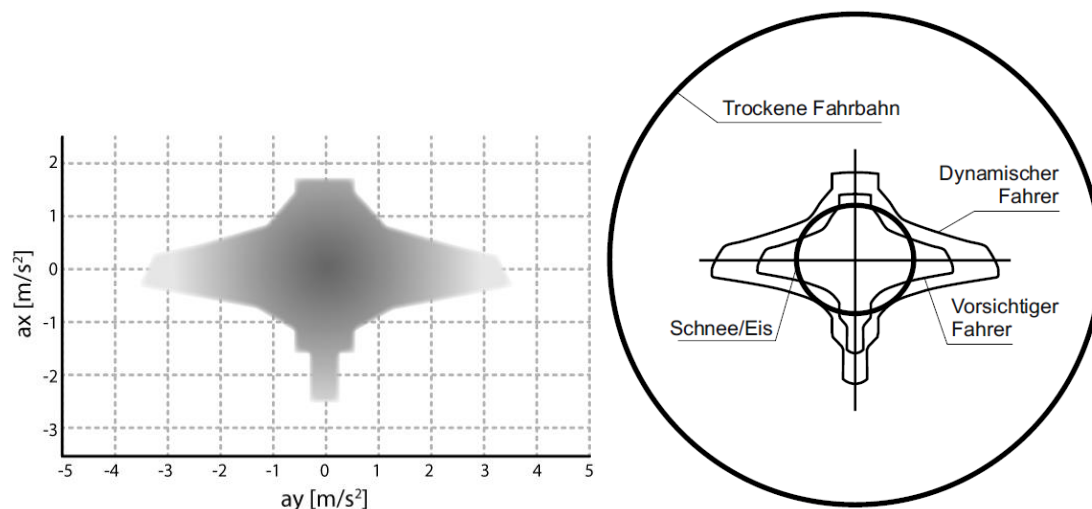


Abbildung 8a und b: Von Normalfahrern ($n=12$) genutzter Bereich der Quer- und Längsbeschleunigung aus Donges (2009) nach Wegscheider & Prokop (2005). Die Form kennzeichnet den Beschleunigungsbereich, der in 85% der Fahrtzeit von keinem Fahrer überschritten wurde (85%-iges Perzentil). Abbildung 8b (rechts) zeigt den genutzten fahrdynamischen Bereich für verschiedene Fahrerkollektive in Zusammenhang mit der Kraftschlussgrenze.

Die „ausgerundete Kreuzform“ in Abbildung 8a liefert nach Donges deutliche Hinweise darauf, dass die untersuchten Fahrer nur bedingt in der Lage waren, kombinierte Lenk-Brems- und Lenk-Beschleunigungsmanöver auszuführen. Vor dem Hintergrund weiterer Daten betont der Autor zudem die relativ große Differenz zwischen den von den Fahrern erzeugten Beschleunigungen und der

Kraftschlussgrenze (Kammischer Kreis) bei trockener Fahrbahn (Abbildung 8b). Demzufolge könnten unter guten Umweltbedingungen größere Beschleunigungen zur Bewältigung kritischer Situationen erzeugt werden. Zu einem vergleichbaren Schluss kommen auch Neukum, Krüger & Schuller (2001). In einer Befragung von 20 Autofahrern konnten die Autoren zeigen, dass Fahrer die eigene Geschwindigkeit anpassen, um die Fahraufgabe in einem niedrigen Schwierigkeitsbereich zu absolvieren. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die genutzten fahrdynamischen Bereiche unterschiedlicher Fahrer stark streuten.

Auch Donges diskutiert die individuell unterschiedlichen Fahrleistungen verschiedener Fahrer und unterstreicht deren Bedeutung für die gezielte Unterstützung einzelner Fahrer durch automatische Systeme. Um interindividuellen Leistungsunterschieden von Fahrern gerecht zu werden, fordert Donges eine Berücksichtigung des individuellen Erfahrungshorizonts. Korrigierende Eingriffe könnten zum Beispiel für sportliche Fahrer später als für defensive Fahrer vorgenommen werden. Die für den Bereich der teilautomatisierten Fahrfunktionen relevanteste Forderung bezieht sich auf die Art der aktiven Eingriffe. Da davon auszugehen ist, dass Fahrer nicht das gesamte fahrdynamische Potential ausschöpfen, sollte die „überwiegend einkanalige“ Reaktionsweise durch die Ausführung kombinierter Eingriffe in die Quer- und Längsführung unterstützt werden (Donges, 2009).

Für die Übersteuerung von teilautomatisierten Eingriffen ergibt sich damit aber ein besonderer Bewertungsbedarf (Kleen und Vollrath, 2012). Gerade weil Fahrer in den Grenzbereichen über wenig Erfahrung verfügen, muss automatischen Eingriffen in diesem fahrdynamischen Spektrum mit besonderer Aufmerksamkeit begegnet werden. Anders als im Bereich der Fahrerassistenz muss der Fahrer hier kombinierte Lenk-Brems- oder Lenk-Beschleunigungsmanöver ausführen. Eine Übersteuerung von Eingriffen dieser Art ist besonders bei plötzlich auftretenden, intensiven Manövern wichtig, wie es im Falle von unerwünschten Brems-Ausweichmanövern der Fall sein kann. Obwohl eine Reaktion auf diese Art der Manöver ohne Zweifel höhere Anforderungen an den Fahrer stellt als weniger kritische Eingriffe, müssen auch schwächere Eingriffsbilder betrachtet werden. Kombinierte Eingriffe mit niedrigerer Intensität können z.B. mit automatisch ausgeführten Spurwechselmanövern auftreten, bei denen eine moderate Verzögerung oder Beschleunigung notwendig ist.

Das Fahrverhalten der oben beschriebenen Population deutet darauf hin, dass bereits relativ schwache Beschleunigungskombinationen sehr selten ausgeführt werden und damit eher ineffektivere, wissensbasierte Reaktionen erfordern (vgl. Kapitel 2.2). Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass die in Kapitel 2.4.2 beschriebene Entkoppelung basaler Kontrollschleifen die Handlungsregulation erschweren kann.

Die Übersteuerung von unerwünschten Eingriffskombinationen kann damit in zweierlei Hinsicht eine Herausforderung für den Fahrer darstellen. Zum einen könnten die notwendigen Reaktionen auf der Basis einer verschlechterten Informationsverarbeitung stattfinden. Zum anderen muss davon ausgegangen werden, dass wenig Erfahrung für die notwendigen Fahrerreaktionen besteht und damit gering ausgeprägte Handlungsroutinen vorliegen. Die Anforderungen teilautomatischer Fahrfunktionen übersteigen damit die Aufgaben des Fahrers im Bereich der Assistenz. Die Reaktion auf kombinierte

Eingriffe in die Quer- und Längsführung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt wenig untersucht und stellt ein zentrales Anliegen der vorliegenden Arbeit dar.

2.6 Bewertung der Beherrschbarkeit von automatischen Fahrfunktionen

Bewertungen der Beherrschbarkeit von automatischen Fahrfunktionen sind insbesondere für den Bereich der Fahrerassistenz vorgenommen worden. In formaler Hinsicht unterstützt der innerhalb des PREVENT-Projektes erarbeitete RESPONSE Code of Practice diesen Prozess, indem entwicklungsbegleitende Anforderungen formuliert und Bewertungsverfahren vorgeschlagen werden. Inwieweit sich die für den Assistenzbereich beschriebenen Ansätze auf teilautomatische Systeme übertragen lassen, soll im Folgenden geklärt werden.

Darüber hinaus sind in verschiedenen Arbeiten Ansätze und Maße zur Beschreibung der Übersteuerbarkeit automatischer Funktionen entwickelt worden. Besonders auf dem Gebiet der querführenden Assistenz liegen umfangreiche Befunde zur Beherrschbarkeit von Eingriffen in die Lenkung und zu deren wesentlichen Determinanten vor. Ebenso beschäftigen sich mehrere Arbeiten mit der Fähigkeit des Fahrers, die Fahraufgabe nach zuvor automatisch ausgeführten Fahrten wieder zu übernehmen. Auf diese beiden Aspekte soll im Folgenden eingegangen werden. Dabei steht die Frage im Vordergrund, welche der bisher verwendeten Ansätze und Maße sich für die Bewertung einer teilautomatisierten Funktion eignen.

2.6.1 Anforderungen des Response Code of Practice

Der Response Code of Practice (CoP) ist ein checklistenbasiertes Verfahren, das die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, einschließlich der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, über den gesamten Entstehungszeitraum bis hin zur Markteinführung unterstützen soll. Motivation für die Formulierung derartiger Leitlinien war die zurückhaltende Markteinführung neuartiger Funktionen und der Mangel an Kriterien, die eine sicherheitstechnische Bewertung zulassen (Donner et al., 2007). Um den Anforderungen einer nutzergerechten Systemgestaltung gerecht zu werden, definiert der Response Code of Practice einen entwicklungsbegleitenden Evaluationsprozess. Das Vorgehen (siehe Abbildung 9a) beschreibt hierbei verschiedene Phasen der Systementwicklung und ordnet den einzelnen Schritten Bewertungen zu (Abbildung 9b). Die einzelnen Bewertungsschritte berücksichtigen sowohl technische, rechtliche als auch fahrerbezogene Aspekte. Die Beherrschbarkeit (engl. Controllability) der Assistenzfunktion wird dabei als zentrales Bewertungskonzept verwendet.

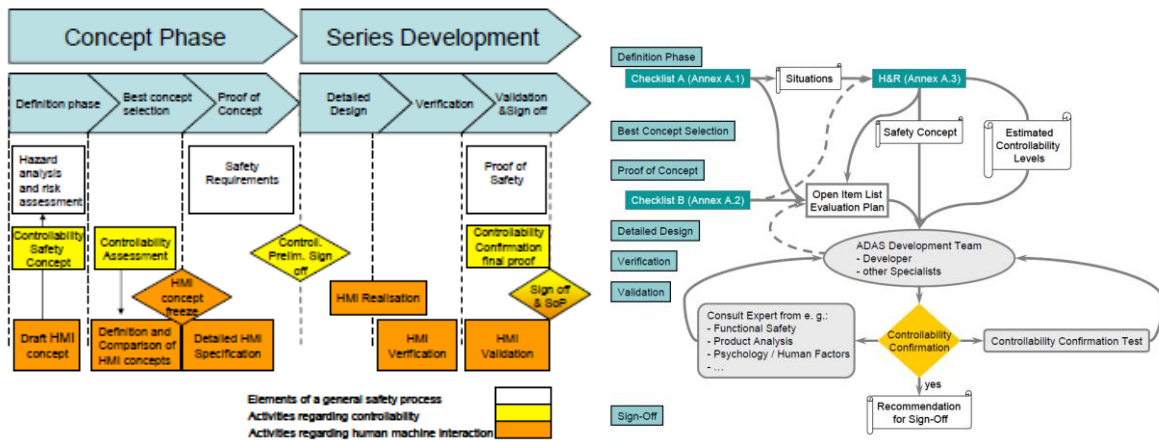


Abbildung 9a und b: Darstellung des im Code of Practice (PReVENT, 2009) vorgeschlagenen Entwicklungsprozesses (links) und des „Controllability Workflows“ (rechts). Den verschiedenen Entwicklungsschritten werden begleitende Bewertungsschritte zugeordnet.

Die Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen wird dabei als „likelihood that the driver can cope with driving situations“ (PReVENT, 2009) definiert und auf den Normalbetrieb („within system limits“), den Umgang mit Systemgrenzen („at system limits“) und auf mögliche Systemfehler („with system failures“) bezogen. Bewertungen der Beherrschbarkeit sollten dementsprechend nachweisen, dass Fahrer in der Lage sind, das Fahrzeug in allen oben genannten Betriebszuständen zu kontrollieren.

Die Beherrschbarkeit einer Funktion wird diesen Überlegungen zufolge durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Dazu gehört die Fähigkeit des Fahrers, eine kritische Situation wahrzunehmen, sich für eine geeignete Gegenmaßnahme zu entscheiden und diese auch in zufriedenstellendem Maße auszuführen (PReVENT, 2009). Analog zu den Bestrebungen, die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug durch standardisierte Verfahren abzusichern, ist die Erarbeitung der ISO Norm 26262 zur funktionalen Sicherheit von Straßenfahrzeugen zu sehen. Während der Response Code Of Practice insbesondere die optimale Entwicklung der Interaktionskonzepte fokussiert, bezieht sich die ISO Norm 26262 auf die Zertifizierung der eigentlichen Assistenzfunktion bzw. deren Entwicklung.

Auch für den Bereich der teilautomatisierten Fahrfunktionen bietet sich die im Code of Practice vorgeschlagene Betrachtung verschiedener Systemzustände an. Der Einsatz im Normalbetrieb erfordert insbesondere die Überwachung der Fahrfunktion durch den Fahrer. Mögliche Auswirkungen auf das Situationsbewusstsein, wie sie in Kapitel 2.4.2 diskutiert wurden, müssten sich jedoch ebenso im Umgang mit Systemgrenzen und Systemfehlern bemerkbar machen. Eine Analyse dieser Interaktionsprozesse kann daher in einem ersten Schritt auch Aussagen über die Nutzung des Normalbetriebs gestatten. Da der Fahrer im Bereich der teilautomatischen Fahrfunktionen jederzeit zu einer unmittelbaren Übernahme der Fahraufgabe in der Lage sein muss (Gasser et al., 2012, vgl. Kapitel 2.1.1), kann der Umgang mit Systemgrenzen durch die Reaktion auf plötzliche Übergabesituationen operationalisiert werden.

Die Betrachtung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei möglichen Systemfehlern kann hingegen durch die Analyse der Reaktionen auf bestimmte Eingriffsbilder geleistet werden. Hierfür bietet sich die Darbietung von kombinierten Lenk-Brems- bzw. Lenk-Beschleunigungs-Manövern an. Wie in Kapitel 2.5 dargestellt,

können Eingriffsbilder dieser Art für Fahrer eine Besonderheit darstellen und unterscheiden sich von bisher betrachteten Fehlerbildern der Fahrerassistenz.

Die Beurteilung der Beherrschbarkeit von Eingriffen und Übernahme-situationen kann auf verschiedene Arten vorgenommen werden. Innerhalb der anfänglichen Konzeptphase, in der die wesentlichen Eigenschaften einer neuen Funktion festgelegt werden, empfiehlt der Code of Practice eine Bewertung durch Expertengruppen. Ein Nachteil dieser eigentlich sehr effektiven Methode liegt in der eingeschränkten Aussagekraft für gänzlich neue Systeme. Da Expertenurteile auf bisher gesammelten Erfahrungen beruhen, ist ein Transfer auf vollkommen neue Funktionalitäten unter Umständen nur eingeschränkt möglich. Zudem wird darauf hingewiesen, dass Expertenurteile oftmals sehr heterogen ausfallen und damit nur schwer Verallgemeinerungen ermöglichen (PReVENT, 2009).

Zur Bewertung früher HMI-Konzepte wird darüber hinaus der Einsatz von rechnergestützten Visualisierungen des Anzeige- und Bedienkonzepts empfohlen. Als relevante Maße zur Beschreibung der Interaktion werden Beispiele wie Bedienzeiten und Fehlermaße genannt. Obwohl die genaue Durchführung nicht näher spezifiziert wird, bietet sich schon hier der Einsatz von unbeteiligten bzw. „naiven“ Probanden an. Obwohl Anzeige- und Bedienkonzepte in diesem frühen Stadium grundsätzlich mit rudimentären Simulationen untersucht werden können, muss das Fehlen einer Fahraufgabe als Nachteil gesehen werden.

Für Studien mit simulierter Fahraufgabe werden verschiedene Möglichkeiten wie Untersuchungen in „Sitzkisten“, feststehenden und dynamischen Fahrsimulatoren genannt. Als besonders vorteilhaft werden diese Studien für die Beurteilung von hoch riskanten Fahrsituationen, Übernahmeszenarien oder für die Beurteilung von Fehlalarmen angesehen (PReVENT, 2009). Simulierte Fahraufgaben ermöglichen die Beurteilung der Beherrschbarkeit durch die Erhebung subjektiver Beanspruchungsmaße und objektiver Kennwerte wie Reaktionszeiten, fahrdynamische Größen oder physiologische Messungen, stellen allerdings bereits ein relativ aufwendiges Bewertungsverfahren dar. Erprobungen dieser Art erfordern eine Implementierung der entsprechenden Algorithmik in die Versuchsumgebung und ermöglichen so Konzeptvergleiche und Variationen von relevanten Parametern.

Die Nachteile dieses Vorgehens werden insbesondere im Zusammenhang mit dem ausbleibenden Erleben der Fahrzeugbeschleunigungen diskutiert. Einerseits wird angenommen, dass fehlende kinästhetische bzw. vestibuläre Wahrnehmungen in Verbindung mit visualisierten Fahrtbewegungen und weiteren Mechanismen der menschlichen Orientierung das Auftreten von Simulator-Sickness-Phänomenen begünstigen (Hoffmann, Krüger & Buld, 2003). Andererseits wird davon ausgegangen, dass sich die Fahrerreaktionen bei der Wahrnehmung fahrdynamischen Veränderungen von denen im Simulator unterscheiden.

Als weitere Möglichkeit werden Bewertungen der Beherrschbarkeit durch die Urteile von Testfahrern beschrieben. Dabei wird davon ausgegangen, dass professionelle Testfahrer aufgrund ihrer Erfahrung mit verschiedenen Systemen in der Lage sind, deren Eigenschaften zu beurteilen und diese durch standardisierte Verfahren zu bewerten. Bewertungen dieser Art sind auch mit sehr frühen Prototypen

möglich und sollen schnelle Aussagen über die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für den Einsatz durch „Normalfahrer“ ermöglichen. Neben den Vorteilen dieser Methode werden auch Nachteile besprochen. Da sämtliche Bewertungen auf die Erfahrungen mit bisherigen Systemen zurückgehen, können die hierbei gewonnen Erkenntnisse unter Umständen keine ausreichende Basis für die Bewertung gänzlich neuer Funktionen liefern. Ein wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung der Auswirkungen neuer Systeme auf „Normalfahrer“ ist die Fähigkeit von professionellen Testfahrern, die Möglichkeiten und Grenzen durchschnittlicher Fahrer einzuschätzen und entsprechend zu beurteilen. Gelingt dies nur unzureichend oder gar nicht, sind Aussagen über die Beherrschbarkeit nur noch sehr eingeschränkt möglich. Da zudem in der Regel nur eine begrenzte Anzahl von Testfahrern zur Bewertung eingesetzt werden, können die abgegebenen Urteile erheblich variieren und eindeutige Schlüsse erschweren (PReVENT, 2009).

Aus den oben beschriebenen Gründen wird die Beherrschbarkeitsbewertung durch Realfahrtstudien mit „Normalfahrern“ bzw. mit „naiven“ Testpersonen als valideste Methode beschrieben. Im Wesentlichen gelten hier die oben diskutierten Vorteile der Simulatorstudie, ohne dass die Aussagekraft der Ergebnisse durch mangelnde kinästhetische Effekte eingeschränkt werden muss. Obwohl diese Methode als beste Herangehensweise bezeichnet werden kann, gelten auch hier verschiedene Einschränkungen. Das Testen neuer Funktionen im Straßenverkehr kann, gerade im Hinblick auf die Simulation von Übernahmesituationen und Fehlerbildern, zu beanspruchend für Normalfahrer sein. Zwar finden entsprechende Untersuchungen in Begleitung von Versuchsleitern statt, die Darbietung von Systemeingriffen mit zunächst schwer abzusehenden Auswirkungen verbietet sich dennoch.

Für die Bewertung einer teilautomatischen Fahrfunktion bieten sich insbesondere die simulationsgestützte Evaluation und die Analyse durch Realfahrtstudien an. Die relevantesten Analysebereiche beziehen sich auf die Übernahme einer zuvor automatisch ausgeführten Quer- und Längsführung sowie auf deren Übersteuerbarkeit. Da es sich hierbei einerseits um aktive Eingriffe in die Fahraufgabe handelt, jedoch andererseits davon ausgegangen werden muss, dass deren Wirkweise sich wesentlich von bisherigen Assistenz-Eingriffen unterscheidet, sollten die Auswirkungen der tatsächlichen Systemhandlungen untersucht werden. Darüber hinaus erscheint eine Bewertung durch Normalfahrer angebracht, da eine Einschätzung durch professionelle Testfahrer aufgrund des Neuigkeitswertes nur eingeschränkt möglich ist. Die Betrachtung der Übernahme und Übersteuerung von teilautomatisierten Funktionen innerhalb einer experimentellen Analyse bietet zudem die Gelegenheit, Untersuchungsmethoden für die Betrachtung noch folgender, höher automatisierter Systeme zu erarbeiten.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung der Beherrschbarkeit und die daran angeschlossenen Sign-off-Prozesse stellt die „Checkliste A“ dar (vgl. Abbildung 9b). Ziel dieser Themensammlung ist, eine möglichst detaillierte Spezifikation der zu entwickelnden Assistenzfunktion. Damit einhergehend soll eine frühzeitige Identifikation eventueller Beherrschbarkeitsprobleme ermöglicht werden. Die in der Checkliste enthaltenden Aspekte betreffen alle drei Komponenten des Systems „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“ und bieten umfangreiche Spezifikationsmöglichkeiten an. Neben den Eigenschaften und Erwartungen des Fahrers (z.B. zu erwartende Risikokompensation oder spezielle psychomotorische Anforderungen) wird

den Systemeigenschaften besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Dazu gehören unter anderem die Spezifikation der unterstützten Fahraufgabe (Stabilisierung, Bahnführung oder Navigation, vgl. Kapitel 2.2) oder die Einordnung anhand des Unterstützungsgrades (z. B. warnend oder assistierend, vgl. Kapitel 2.1.1).

Darüber hinaus spielen Umweltfaktoren eine entscheidende Rolle bei der Identifikation möglicher Probleme. Dies schließt z. B. wetterbedingte Einflüsse und insbesondere Auswirkungen der Infrastruktur auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit ein. Zu den betrachteten Aspekten zählen ebenfalls Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, der Fahrstreifenmarkierung und mögliche Einflüsse weiterer Objekte. Von besonderem Interesse sind zudem übergeordnete Spezifikationen, die die Art der eigentlichen Verkehrssituation betreffen. Die „Checkliste A“ erfragt hierzu unter anderem die Beschränkung auf bestimmte Straßentypen, mögliche Einflüsse der Straßenführung und zu erwartende Auswirkungen von Baustellensituationen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion.

Da die Identifikation möglicher Probleme innerhalb der initialen Spezifikation die Grundlage für spätere experimentelle Analysen bildet, hat die Identifikation relevanter Verkehrsszenarien starken Einfluss auf die Bewertung der Beherrschbarkeit. Hierbei stellt sich zum einen die Frage, welche notwendigerweise begrenzte Anzahl von Fahrszenarien experimentell betrachtet werden soll. Zum anderen ist die Identifikation von „Worst-Case“-Szenarien vor allem unter methodischen Gesichtspunkten interessant. Erweist sich ein einzelnes Untersuchungsszenario für die Betrachtung verschiedener Eingriffsbilder oder Systemzustände als besonders sensitiv, können vergleichbare Systeme mit geringem Aufwand untersucht werden.

Für teilautomatisierte Fahrfunktionen sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine sensitiven Untersuchungsszenarien bekannt. Wie im Folgenden zu zeigen sein wird, ist die Rolle des Fahrszenarios jedoch insbesondere für den Bereich der querführenden Assistenz bereits umfassend untersucht worden. Inwieweit sich die hier betrachteten Szenarien auf die Bewertung teilautomatisierter Funktionen übertragen lassen, wird noch zu klären sein. Die Identifikation sensitiver Fahrszenarien und der Vergleich der Auswirkungen lateraler und teilautomatisierter Systeme stellt damit ein weiteres Anliegen der vorliegenden Arbeit dar. Im Folgenden soll daher auf bisher verwendete Untersuchungsansätze und Ergebnisse zum Umgang mit möglichen Fehlerbildern und Systemgrenzen eingegangen werden.

2.6.2 Bewertung von Übernahmeszenarien

Arbeiten, die explizit die Beherrschbarkeit von automatischen Fahrfunktionen an Systemgrenzen aufgreifen, finden sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur vereinzelt in der Literatur. Ein Beispiel für die Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Übernahmesituationen bietet die Arbeit von Neukum et al. (2008). Gegenstand der Studie sind die Fahrerreaktionen auf unangebrachte Beschleunigungseingriffe eines ACC-Stop&Go-Systems. Die Prüfsituation bezog sich hierbei auf ein durch das System nicht erkanntes, stehendes Fahrzeug und die dabei notwendige Bremsreaktion und Übernahme des Fahrers. Jeder Proband dieser Studie wurde vier Mal mit dieser Systemgrenze konfrontiert. Die Prüfsituationen wurden im öffentlichen Verkehr umgesetzt, nachdem die Probanden ausreichend Gelegenheit hatten,

sich mit dem System vertraut zu machen und den Normalbetrieb kennenzulernen. Die Teilnehmer wurden zudem nicht auf die Darbietung der Systemgrenze vorbereitet.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen in mehrfacher Hinsicht relevante Aspekte für die Bewertung des Fahrerverhaltens an Systemgrenzen auf. Zunächst konnte festgestellt werden, dass die Kontrolle der Fahrfunktion, also die rechtzeitige manuelle Bremsung und Übernahme der Fahraufgabe, kein Problem darstellte. Bei keinem der Probanden musste eine drohende Kollision durch den Eingriff eines Beifahrers verhindert werden. Unter methodischen Gesichtspunkten zeigte sich darüber hinaus, dass die Verwendung weiterer Maße zur Beschreibung des Verhaltens und Erlebens, im Sinne eines „Mehrfachkriterienansatzes“ (Neukum et al., 2008), die Ergebnisse deutlich differenzieren konnte. Neben den Eingriffen des Versuchsleiters wurden daher ebenso objektive Kennwerte zur Erfassung möglicher kritischer Fahrsituationen herangezogen (Time to Collision, „TTC“ < 1.5 s und Längsverzögerungen >5 m/s²).

Des Weiteren wurde die subjektiv empfundene Kritikalität anhand einer modifizierten Form der Störungsbewertungsskala (Neukum & Krüger, 2003) erhoben. Der Vorteil dieser Skala, gegenüber herkömmlichen Beanspruchungsmessungen, wird von den Autoren in der klaren Abgrenzung von störenden und tatsächlich als gefährlich erlebten Erlebnissen beschrieben (Bewertungen >7, Neukum et al., 2008). Die Bewertungen erfolgten in direktem Anschluss an die untersuchte Fahrsituation.

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
störend	6
	5
	4
spürbar	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Abbildung 10: Modifizierte Störungsbewertungsskala nach Neukum und Krüger (2003) aus Neukum et al. (2008).

Durch die Verwendung verschiedener Datenebenen konnten die Autoren zeigen, dass die alleinige Berücksichtigung gegebenenfalls notwendiger Eingriffe des Versuchsleiters der eigentlichen Kritikalität der Prüfsituationen nicht gerecht wird. Weiterhin konnten durch die wiederholte Darbietung der Systemgrenzen deutliche Lerneffekte festgestellt werden, indem die erste Konfrontation mit der funktionalen Systemgrenze wesentlich häufiger durch den Skalenbereich „gefährlich“ bewertet wurde als spätere Konfrontationen. Die objektiven Kennwerte stützten dieses Muster, indem sich die minimalen TTC-Werte über den Verlauf vergrößerten und sich die Extrema der Längsbeschleunigungen verkleinerten.

Einen weiteren Vorteil der Verwendung mehrerer Datenebenen konnten Neukum et al. durch die Objektivierung der Subjektivurteile aufzeigen. Eine Aufschlüsselung der minimalen TTC-Werte anhand der Kategorien der Störungsbewertungsskala zeigte, dass Fahrer „gefährliche“ Bewertungen ab einer

zeitlichen Distanz von ca. 1.5s abgaben. Die Aufschlüsselung der Längsbeschleunigungen anhand der gleichen Methodik zeigte mit kritischen Bewertungen ab -4m/s^2 zudem sogar geringere als aus der Literatur bekannte Werte.

Die in der oben beschriebenen Studie betrachtete funktionale Systemgrenze unterscheidet sich von den bisher definierten Grenzen der teilautomatisierten Systeme in mehreren Punkten. Zum einen bezieht sich die ACC-Funktionalität nur auf die Fahrzeuglängsführung und nicht auf einen gleichzeitigen Ausfall der Querführung. Noch wichtiger ist hierbei allerdings die Tatsache, dass es sich nicht um eine bloße systemseitige Deaktivierung der Fahrfunktion und eine darauf folgende Übernahme handelt. Vielmehr mussten die Probanden das System durch den manuellen Brems Eingriff zunächst übersteuern und im Anschluss daran die Fahraufgabe ohne zeitliche Reserve übernehmen. Streng genommen erfolgte die eigentliche Übernahme damit als eine Folge der eigenen Handlung und hätte damit besser antizipiert werden können als ein unmittelbares Versagen zuvor unterstützter Teilfahraufgaben. Dennoch zeigen die Ergebnisse wesentliche Bewertungsansätze der Beherrschbarkeit auf, indem mehrere Datenebenen betrachtet und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die hierbei verwendeten Ansätze finden sich ebenfalls in der Analyse von Fehlerbildern wieder und sollen auch in der vorliegenden Arbeit verwendet werden.

Neben den von Neukum et al. durchgeführten Arbeiten zur Beherrschbarkeit von funktionalen Systemgrenzen finden sich verschiedene weitere Studien zum Umgang mit plötzlich ausbleibender Unterstützung durch technische Systeme. Die im Folgenden besprochene Untersuchung fokussiert eine tatsächliche Übernahmesituation stärker, wenngleich auch hier keine teilautomatisierte Fahrfunktion betrachtet wurde. Dennoch wird die Rolle der oben angesprochenen Verkehrssituation intensiver beleuchtet. Die von Damböck et al. (2012) durchgeführte Simulatorstudie fokussiert dabei vor allem den Umgang mit funktionalen Systemgrenzen im Bereich des hochautomatisierten Fahrens. Die Autoren untersuchten hierbei das subjektive Empfinden und die Fahrleistung in Abhängigkeit von der Dauer vorhergehender Übernahmeaufforderungen (Take Over Request, „TOR“-Zeiten: vier, sechs und acht Sekunden). Als zweite unabhängige Variable wurden zudem die kognitiven Anforderungen zum Zeitpunkt der Übernahme getestet. Diese Einflussgröße wurde durch die Umsetzung verschiedener Fahrszenarien realisiert. Da die Übernahmen einer hochautomatisierten Fahrt untersucht werden sollten, beinhaltet das Untersuchungsparadigma eine starke Ablenkung der Probanden ($n=32$), indem die Bearbeitung einer Nebenaufgabe gefordert wurde.

Als Ausgangspunkt der Variation wurden die in Kapitel 2.2 beschriebenen Fahraufgaben nach Donges (1983) und die damit assoziierten Verhaltensweisen nach Rassmussen (1982, siehe Abbildung 1) verwendet. Als Szenario mit den niedrigsten Anforderungen (fertigkeitstbasiertes Verhalten) wurde eine Übernahmesituation realisiert, die durch den Wegfall der Fahrbahnmarkierung bedingt wurde. Dieses Untersuchungsszenario wurde innerhalb einer leichten Kurvenfahrt auf einer Autobahn umgesetzt. Entsprechend den oben dargestellten Überlegungen bestanden die Anforderungen hier lediglich in der Stabilisierung des Fahrgeschehens. Regelbasierte Verhaltensweisen sollten hingegen durch die Ausführung eines notwendigen Fahrstreifenwechsels und damit durch Aufgaben der Fahrzeugführung umgesetzt werden. Als Szenario mit den höchsten kognitiven Anforderungen (wissensbasierte

Verhaltensweisen) wurden die Probanden zudem mit einer Fahrbahnteilung konfrontiert. Unmittelbar nach der Übernahme der Fahraufgabe bestand die Aufgabe der Teilnehmer darin, einem vorgegebenen Fahrstreifen zu folgen und damit eine Navigationsaufgabe zu lösen.

Für alle diese Szenarien wurden sowohl Pass-Kriterien als auch mögliche Fahrfehler definiert. Um das fertigkeitsbasierte Szenario als „bestanden“ zu bewerten, durften keine Kollisionen mit dem umgebenden Verkehr auftreten. Das regelbasierte Szenario forderte hingegen einen rechtzeitigen Beginn des Fahrstreifenwechsels, während innerhalb des wissensbasierten Szenarios ein rechtzeitiger Abschluss des Fahrstreifenwechsels vollzogen werden musste. Fahrfehler wurden dann festgestellt, wenn entweder Fahrstreifenwechsel ausgelassen, nicht rechtzeitig abgeschlossen oder in eine falsche Richtung vorgenommen wurden. Neben den oben beschriebenen Versuchsfahrten wurden diese Kriterien ebenfalls innerhalb komplett manuell ausgeführter Fahrten gemessen, um entsprechende Vergleiche zu ermöglichen.

Die Autoren konnten zeigen, dass Stabilisierungsaufgaben (fertigkeitsbasierte Anforderungen) im Anschluss an eine Übernahme von zuvor automatisch ausgeführten Fahraufgaben für alle TOR-Zeiten problemlos bewältigt werden konnten. Für regel- oder wissensbasierte Anforderungen zeigten sich jedoch differenziertere Ergebnisse. Insgesamt konnten die Autoren feststellen, dass eine längere Vorwarnzeit in beiden Szenarien zu einer verbesserten Situationsbewältigung führte. Fahrleistungen, die mit der manuellen Fahrt vergleichbar sind, konnten jedoch erst ab einer Vorwarnzeit von acht Sekunden festgestellt werden (Damböck et al., 2012). In den beiden Szenarien mit höheren kognitiven Anforderungen (Fahrstreifenwechsel und Fahrstreifenauswahl) traten mit geringeren TOR-Zeiten (vier und sechs Sekunden) zudem relativ große Anteile von Fahrfehlern auf. Mussten zur Lösung der Situation regelbasierte Verhaltensweisen gezeigt werden, wurden mit sechs Sekunden Vorlauf in ca. 40% der Situationen Fahrfehler identifiziert. Bei einer Vorwarnzeit von vier Sekunden erhöhte sich der Anteil von fehlerhaften Reaktionen auf ca. 84%. Ein vergleichbares Muster zeigte sich für die Anforderung von wissensbasierten Verhaltensweisen nach Übernahme-situationen. Wurden die Fahrer sechs Sekunden vor der Übergabe der Fahraufgabe durch eine Information alarmiert, zeigten sich in der Hälfte aller Fälle Fahrfehler. Vorwarnzeiten von vier Sekunden gingen mit einem Fehleranteil von ca. 78% einher. Mindestens die Hälfte dieser Fehler mussten dabei nach den eingangs formulierten Pass- / Fail-Kriterien als fatal gewertet werden.

Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass bei der Verwendung konservativer Pass- / Fail-Kriterien eine sichere Übernahme erst für eine Vorwarnzeit von acht Sekunden angenommen werden kann. Die Autoren betonen jedoch gleichermaßen, dass bei der Verwendung weniger konservativer, aber ebenso zulässiger Kriterien (z. B. Kriterien nach Tönert, 2011) eine sichere Fahrzeugübernahme bereits für eine Vorwarnzeit von 6 Sekunden festgestellt werden kann. Das subjektive Empfinden der Probanden unterstützt das oben gewonnene Bild dabei weitgehend.

Für die Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion an Systemgrenzen bei teilautomatisierten Funktionen lassen sich damit verschiedene Aspekte ableiten. Wie Damböck et al. zeigen konnten, kann das jeweilige Fahrszenario bzw. die damit verbundenen Anforderungen an den Fahrer einen entscheidenden Einfluss

auf die Güte der Übernahmereaktion haben. Insbesondere Fahrsituationen, die regel- oder wissensbasierte Verhaltensweisen von zuvor abgelenkten Fahrern erfordern, können erhebliche Anforderungen an die Vorwarnzeit stellen. Im Bereich der Teilautomation müssen Fahrer sogar in der Lage sein, die Fahraufgabe ohne zeitliche Reserve zu übernehmen. Andererseits muss hierbei jedoch nicht von einer Ablenkung durch die Ausführung von Nebenaufgaben ausgegangen werden. Inwieweit der plötzliche Wegfall einer zuvor teilautomatisiert ausgeführten Quer- und Längsführung mit dem jeweiligen Fahrszenario interagiert und potentiell besonders kritisch ist, bleibt dennoch zu klären. Darüber hinaus sprechen die oben beschriebenen Ansätze deutlich für die Verwendung mehrerer Bewertungskriterien.

Besonders die von Neukum et al. vorgenommenen Bewertungen zeigen den Vorteil weiterer subjektiver und objektiver Maße auf. Ebenso diskutieren Damböck et al. die Verwendung weiterer, weniger konservativer Pass- / Fail-Kriterien und untermauern ihre Argumentation durch die Beschreibung eines angemessenen Fahrerverhaltens anhand von Trajektoriedaten. Die Verwendung verschiedener Datenebenen findet ebenfalls zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Systemfehlern ihren Einsatz. Im Folgenden sollen diese Bewertungsansätze beschrieben werden. Aufgrund des Umfangs der bisherigen Arbeiten zu diesem Thema erfolgt die Darstellung verkürzt. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf der Identifikation von Faktoren, die das Verhalten und Erleben im Umgang mit fehlerhaften, teilautomatisierten Systemen beeinflussen können.

2.6.3 Bewertung von Fehlerbildern

Bewertungsansätze, die sich mit den Reaktionen auf mögliche Systemfehler beschäftigen, konzentrieren sich im Wesentlichen auf drei zentralen Aspekte des Systems „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt“.

1. Auf Seiten des Systems werden die Auswirkungen verschiedener Fehlerbilder auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion untersucht. Um relevante Einflüsse und mögliche Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Eigenschaften zu identifizieren, werden in der Regel mehrere Charakteristika systematisch variiert.
2. Im Bereich der querführenden Assistenz werden hierbei z. B. unterschiedliche Signalformen wie sprunghafte oder rampenförmige Lenkmomente (Gradient) sowie deren Intensität (Amplitude) und Dauer (Latenz) untersucht (z. B. Neukum et al., 2009). Neben den Signaleigenschaften im engeren Sinne werden zudem auch Einflüsse der Eingriffsrichtung untersucht, die eng mit dem jeweiligen Fahrszenario verknüpft sind (z. B. Schmidt, 2009).
3. Auf Seiten der Umwelt stellt die Untersuchung und Variation verschiedener Fahrszenarien ein zentrales Anliegen in der Bewertung von Eingriffsbildern dar. Zum einen soll damit die Identifikation von potentiell besonders kritischen Szenarien ermöglicht werden. Darüber hinaus eignet sich die Untersuchung verschiedener Szenarien, um das Zusammenspiel von Umweltfaktoren und Eingriffseigenschaften zu analysieren. Neben den oben genannten Charakteristika wie Signalform und Intensität kann hierbei die Richtung, mit der bestimmte Eingriffe vorgenommen werden, besondere Bedeutung erlangen. Als Beispiel hierfür kann die

Eingriffsrichtung von Lenkmomenten in Kurvenfahrten herangezogen werden. Unter methodischen Gesichtspunkten eignet sich die Variation des Fahrscenarios zur Identifikation besonders sensibler Prüfscenarien („Worst-Case-Szenarien“, Schmidt, 2009), um weitere Untersuchungen mit einer geringeren, aber effektiveren Anzahl von Prüfscenarien durchführen zu können.

4. Ein weiteres zentrales Anliegen in der Untersuchung von assistenzbasierten Eingriffsbildern betrifft die Objektivierung der subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen. Die vom Fahrer wahrgenommenen Effekte eines Fehlerbildes stellen innerhalb der Beherrschbarkeitsbewertung eine Schlüsselgröße dar und ergänzen die Pass- / Fail-Kriterien durch wichtige Informationen (vgl. Kapitel 2.6.2). Des Weiteren können die Subjektivurteile auf fahrphysikalische Führungsgrößen zurückgeführt werden und somit als Ausgangspunkt für die Definition fahrzeugunabhängiger Grenzwerte dienen. Im Bereich der querführenden Assistenz werden hierfür Kennwerte der Gierrate und der Längsbeschleunigung diskutiert (Schmidt, 2009; Neukum et al., 2009). Diese Kennwerte stehen einerseits in engem Zusammenhang zu den vom Fahrer wahrgenommenen Auswirkungen der Lenkeingriffe und können andererseits unabhängig von den jeweiligen Fahrzeugeigenschaften (z. B. der Fahrwerksauslegung) bestimmt werden. Im Bereich der Längsführung werden hierfür zudem die in Kapitel 2.6.3 beschriebenen Kennwerte der Längsbeschleunigung herangezogen.

Neben diesen zentralen Bewertungsaspekten werden verschiedene weitere Faktoren untersucht, die Einfluss auf die Beherrschbarkeit automatischer Fahrfunktionen und die Bewertung von Fehlerbildern haben können. Dazu gehören Fragestellungen, die sich z. B. auf den Aktivierungszustand der Fahrfunktion während der Darbietung des jeweiligen Eingriffsbildes oder auf die jeweilige Geschwindigkeit während des Prüfmanövers beziehen. Fragestellungen dieser Art sind zum Teil spezifischer Natur und im Rahmen einer ersten Betrachtung zunächst zweitrangig. Um zu untersuchen, welche Einflüsse die Eigenschaften des Fahrers auf die Beherrschbarkeit bestimmter Eingriffsbilder haben können, werden die Auswirkungen von Fehlerbildern zudem auch anhand von schwächeren oder besonders gefährdeten Subpopulationen untersucht (Schmidt, 2009 nach PREVENT, 2006). Die von Schmidt (2009) vorgelegte Arbeit zur Bewertung haptischer Signale in der Lenkung berücksichtigt hierzu Fahrer mit einem Alter von über 65 Jahren sowie jüngere Fahrer unter 25 Jahren. Beide Subpopulationen werden hierbei aufgrund ihrer überdurchschnittlichen Gefährdung, Verursacher eines Unfalls zu sein, betrachtet (Schmidt, 2009). Insgesamt zeigen sich in verschiedenen Arbeiten für diesen Faktor keine Einflüsse, sodass sich eine genauere Betrachtung zunächst nicht aufdrängt. Um relevante Fragestellungen und Ansätze für die Bewertung von Eingriffsbildern teilautomatisierter Funktionen zu identifizieren, werden im Folgenden die Ergebnisse zu den oben genannten Schwerpunkten beschrieben und auf kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung bezogen.

2.6.3.1 Auswirkungen der Eigenschaften von Fehlerbilder

Arbeiten, die die Rolle einzelner Charakteristika von Fehlerbildern beleuchten, liegen im Wesentlichen nur für den Bereich der Lenkeingriffe vor. Wie in der obigen Aufstellung bereits erwähnt, werden hierbei die Auswirkungen unterschiedlicher Gradienten, Amplituden und Latenzen von zusätzlichen

Lenkmomenten untersucht. Die Erkenntnisse werden hierbei zum Teil durch Simulatorstudien, in einem überwiegenden Anteil jedoch durch Untersuchungen im Realfahrzeug gewonnen. Schmidt (2009) konnte in verschiedenen Untersuchungen feststellen, dass der Einfluss der Amplitude und des Gradienten eines zusätzlichen Lenkmoments in Zusammenhang stehen und das Ergebnis einer Interaktion sein können. Um das Verhältnis der beiden Signaleigenschaften näher zu beleuchten, wurde die Amplitude des Lenkmoments innerhalb einer Simulatorstudie in drei Intensitätsstufen dargeboten. Alle Amplitudengrößen wurden zudem mit vier unterschiedlichen Gradienten aufgeschaltet. Alle Gradienten hatten hierbei einen rampenförmigen Verlauf und unterschieden sich in der Anstiegssteilheit.

Dabei zeigte sich, dass die subjektive Bewertung des Eingriffs zwar entscheidend von der Stärke des Eingriffs abhängig ist, eine Begrenzung der Anstiegssteilheit des Zusatzlenkmoments den Einfluss der Amplitude jedoch weitgehend verringern kann (Schmidt, 2009). Diese Ergebnisse konnten anhand einer Studie im Fahrzeug validiert werden. Das Verhältnis beider Signaleigenschaften beschreibt Schmidt als „Trade-off“, wobei Lenkeingriffe mit hoher Amplitude nur bei flacher Anstiegssteilheit für den Fahrer kontrollierbar sind, während mit großen Gradienten nur schwächere Eingriffe zulässig sind. Des Weiteren geht Schmidt davon aus, dass der Gradient des Signals die Auswirkungen der Amplitude moderiert und für den Fahrer die wesentliche Bewertungsgrundlage darstellt. Sprungförmige Darbietungen von Zusatzlenkmomenten können demnach bereits bei niedrigerer Intensität zu höheren Störungsbewertungen und einer herabgesetzten subjektiven Beherrschbarkeit führen. Auf der Verhaltensebene zeigen sich mit Eingriffen dieser Art äußerst schnelle Reaktionen, die sich durch das Auftreten von maximalen Lenkradwinkeln nach ca. 200 ms äußern. Liegen geringere Gradienten vor, werden die Lenkeingriffe etwas verspätet begrenzt (Schmidt, 2009; Neukum et al., 2009).

Der Einfluss der Latenz wurde, neben verschiedenen weiteren Faktoren, in der von Neukum et al. (2009) durchgeführten Fahrstudie (n=23) untersucht. Der Untersuchungsansatz entsprach hierbei dem bekannten Vorgehen, während dem Normalfahrer wiederholt mit bestimmten Fehlerbildern konfrontiert und im Anschluss daran um ihre subjektive Störungsbewertung (siehe Kapitel 2.6.2) gebeten wurden. Neben den Subjektivurteilen wurden eine Reihe lenkungsbezogener und fahrphysikalischer Parameter erhoben. Dazu gehörten unter anderem die Soll- und Ist-Lenkmomente, die Extrema der Lenkradwinkel und Lenkgeschwindigkeit, einschließlich deren Zeitpunkte sowie die Maximalwerte der Gierrate. Eine genauere Erläuterung der hier verwendeten Kennwerte wird in Kapitel 4.2.3 vorgenommen. Die systematische Variation der Latenzen von zusätzlichen Lenkmomenten (300, 600 und 1200 ms) zeigte, dass eine Darbietungsdauer von 300 und 600 ms zwar mit stärkeren Fahrzeugreaktionen einherging (aufgrund der Überlagerung von Kompensation und Fehlerrücknahme), jedoch im Vergleich zu länger andauernden Störungen als weniger störend bewertet wurde. Eingriffe mit einer Latenz von 1200 ms wurden hingegen als doppelter Eingriff erlebt (Aufschaltung und Rücknahme des Fehlerbildes) und daher als schwerwiegender wahrgenommen (Neukum et al., 2009).

Für den Bereich der Längsführung liegen keine vergleichbaren Ergebnisse zu den systematischen Variationen von Eingriffseigenschaften vor. Grundsätzlich kann für Beschleunigungseingriffe ebenfalls davon ausgegangen werden, dass sowohl Intensität, Gradient als auch die Latenz einen Einfluss auf die Beherrschbarkeit eines automatischen Eingriffs ausüben können. Eine der wenigen Arbeiten, die die

Beherrschbarkeit von longitudinalen Eingriffen aufgreifen, ist von Fach et al. (2011) vorgelegt worden. Die Arbeit beschreibt jedoch im Wesentlichen ein generelles Vorgehen der Beherrschbarkeitsbewertung und diskutiert verschiedene methodische Aspekte anhand unterschiedlicher Systeme. Im Zusammenhang mit der Entwicklung eines kollisionsvermeidenden Assistenzsystems wird dabei die Untersuchung von Falschauslösungen am Beispiel einer Simulatorstudie besprochen. Eigenschaften der Bremseingriffe und Ergebnisse der Untersuchung werden hierbei nicht genannt. Aussagen über die Beschaffenheit der Bremseingriffe und über besonders beanspruchende Bremsmanöver lassen sich daraus nicht ableiten.

Um das Vorgehen zur Absicherung von Gierreaktionen zu schildern, beschreibt die gleiche Arbeit Ergebnisse einer Fahrstudie, in der die Fahrzeugreaktionen durch einseitige Bremseingriffe hervorgerufen und durch Experten bewertet wurden. Die dargestellten Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass zunehmende Eingriffsstärken zu stärkeren Gierreaktionen führen und gleichermaßen als schwerer beherrschbar eingestuft werden. Dieser Trend zeigt sich sowohl für eine Ausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h als auch für eine Geschwindigkeit von 130 km/h. Darüber hinaus verdeutlichen diese Ergebnisse auch, dass Bremseingriffe, die auf blockierte Räder zurückgehen, im Vergleich zu schlupfgeregelten Eingriffen schwerwiegender bewertet werden. Diese Expertenbewertung trat auch dann auf, wenn die induzierten Störgierraten vergleichbar mit denen der schlupfgeregelten Eingriffe waren. Die Beherrschbarkeit der fehlerhaften Eingriffe wird damit nicht nur in Abhängigkeit von der vorliegenden Intensität betrachtet, sondern mit weiteren Eigenschaften des Eingriffs, in diesem Fall mit dem Bremsverhalten des betroffenen Rades, in Verbindung gebracht. Auf welcher Grundlage diese Urteile beruhen, wird jedoch nicht dargestellt.

Inwieweit sich diese Ergebnisse zu einseitigen Bremseingriffen auf kombinierte Eingriffe übertragen lassen, bleibt jedoch fraglich. Da die Eingriffe im Wesentlichen hervorgerufen wurden, um Auswirkungen auf die Querführung zu untersuchen, können die Expertenbewertungen und die variierten Signalparameter nicht ohne weiteres auf vollwertige Bremseingriffe übertragen werden. Zudem kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht geklärt werden, welchen Auswirkungen positive Beschleunigung auf das Fahrverhalten und die Wahrnehmung haben können.

Die oben dargestellten Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffseigenschaften lassen sich in verschiedener Weise auf den Bereich der teilautomatisierten Funktionen beziehen. Da teilautomatisierte Systeme sowohl die Quer- als auch die die Längsführung beeinflussen und diese Eingriffe potentiell schwerer zu beherrschen sind als eindimensionale Eingriffsbilder (vgl. Kapitel 2.5), gilt diesen Manipulationen besondere Aufmerksamkeit. Sollen derartige Eingriffe experimentell untersucht werden, müssen die Auswirkungen der Eigenschaften beider Eingriffskomponenten berücksichtigt werden. In einem ersten Schritt bietet sich hierbei die Umsetzung eher beanspruchender Signalparameter an. Zeigen sich hierbei angemessene Reaktionen, können die Ergebnisse bereits auf einfachere Eingriffsbilder generalisiert werden. Treten hingegen Schwierigkeiten auf, können die Auswirkungen als Ausgangspunkt für eine graduelle Entschärfung bestimmter Parameter verwendet werden. Als grundlegende Eigenschaft von aktiven Eingriffen in die Fahrzeugführung stellt sich zudem stets die Frage nach der zulässigen Intensität und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-

Interaktion. Die kontinuierliche Darstellung dieser Effekte und die Vorhersage möglicher Auswirkungen auf Grundlage gewonnener Daten setzt die systematische Variation bzw. die Darbietung steigender Eingriffsintensitäten voraus.

Für die laterale Komponente der Eingriffskombinationen bietet sich in einem ersten Schritt die Umsetzung sprungförmiger Lenkmomente an. Den Ergebnissen von Schmidt (2009) folgend, sollten sich die Auswirkungen unterschiedlicher Amplituden bei sehr steilen Gradienten besonders gut beobachten lassen. Um die Wahrnehmung von zweifachen Eingriffen zu vermeiden, bietet sich zudem die Untersuchung kurzer Latenzen an. Alternativ dazu kann eine rampenförmige Rücknahme des Lenkmoments erfolgen. Die Identifikation relevanter Charakteristika der longitudinalen Komponenten gestaltet sich vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Befundlage schwieriger. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass auch hier die Intensität der Beschleunigung einen deutlichen Einfluss auf die Beherrschbarkeit der Eingriffe hat. Ebenso muss angenommen werden, dass plötzlich einsetzende Beschleunigungen stärkere Auswirkungen haben, als langsam einsetzende Änderungen der Geschwindigkeit. Insgesamt empfiehlt sich damit für die longitudinale Komponente die gleiche Betrachtung, wie sie für die lateralen Eingriffe festgestellt wurde. Für eine erste Analyse der Längsführung innerhalb von kombinierten Eingriffen kann die Rolle der Intensität bei möglichst schnell aufgebauten Beschleunigungen untersucht werden.

2.6.3.2 Einflüsse des Fahrscenarios

Die Rolle des Fahrscenarios nimmt bei der Analyse von Eingriffsbildern einen ebenso hohen Stellenwert ein wie in der Betrachtung von Systemgrenzen. Schmidt (2009) formuliert zwei wesentliche Anforderungen an geeignete Prüfsituationen. Zum einen sollten die jeweiligen Szenarien sensitiv genug sein, um sowohl problemlos beherrschbare Eingriffsbilder als auch nicht mehr beherrschbare Eingriffe abbilden zu können. Zum anderen muss ein Bezug zu den realen Fahrscenarios vorhanden sein, der es möglich macht, die experimentell gewonnenen Ergebnisse auf den Straßenverkehr und den üblichen Leistungsbereich des Fahrers zu beziehen.

Um den Einfluss der Fahrsituation im Bereich der lateralen Eingriffe zu untersuchen, wurden in den oben genannten Arbeiten verschiedene Situationen in Betracht gezogen. Als besonders sensibles Szenario konnte dabei ein Engstellen-Szenario mit einer Fahrstreifenbreite von 2,5 m identifiziert werden. Lenkeingriffe innerhalb dieser Engstelle führten im Vergleich zu einer Kurvenfahrt und einem Fahrstreifenwechselmanöver zu erhöhten Störungsbewertungen. Zwar zeigten sich im Vergleich zwischen Kurve und Fahrstreifenwechsel schwächere fahrdynamische Reaktionen innerhalb der Engstelle, ohne dass diese jedoch als schwerwiegender wahrgenommen wurden (Schmidt, 2009). Die in der Kurvenfahrt umgesetzte, querdynamische Ausgangslage erwies sich damit für die subjektive Bewertung als irrelevant.

Dennoch konnten anhand des Kurvenscenarios weitere Einflüsse der Eingriffseigenschaften aufgezeigt werden. Eine getrennte Analyse für Eingriffe zum Kurveninneren und -äußeren zeigte, dass nur bei Eingriffen zum Inneren der Kurve stärkere Fahrzeugreaktionen als innerhalb der Engstelle auftraten. Der Vergleich zu den Auswirkungen von Eingriffen zum Äußeren der Kurve erbrachte keine Unterschiede.

Darüber hinaus erwies sich das Fahrstreifenwechselszenario im Vergleich zu den übrigen Fahrscenarien als unterlegen. Wurden innerhalb des Fahrstreifenwechsels zusätzliche Lenkmomente aufgeschaltet, führte dies zum Teil sogar zu deutlich geringeren Störungsbewertungen. Als Ursache für diesen Befund kommt nach Schmidt die stärkere Lenkaktivität innerhalb eines Fahrstreifenwechsels in Frage, die die Wahrnehmung zusätzlicher Signale erschweren kann. Die Verwendung eines Engstellen-Szenarios zur Bewertung lateraler Eingriffsbilder hat sich zudem in weiteren Studien als effektiv erwiesen. Neukum et al. greifen in ihrer 2009 vorgelegten Untersuchung zudem den Bezug zwischen pylonenbasierten Engstellen und Baustellenbedingungen auf.

Eine vergleichbare Variation von Fahrscenarien für die Untersuchung von Eingriffen in die Querführung liegt zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vor. Für den Bereich der Bremsengriffe scheinen vor allem Situationen relevant, die die Fahrerreaktion in Zusammenhang mit nachfolgenden Fahrzeugen darstellen. Eine Übersteuerung von ungewollten Bremsengriffen müsste hierbei durch Beschleunigungsmanöver des Fahrers erfolgen. Eine systematische Variation des Folgescenarios könnte in der Variation des Abstands bestehen. Für die Prüfung der Fahrerreaktion auf ungewollte Beschleunigungseingriffe bieten sich ebenfalls die Umsetzung eines Folgescenarios und der Einsatz eines Führungsfahrzeugs an. Alternativ kommen hierfür auch der Einsatz baulicher Strukturen wie Fahrstreifenverengungen oder Kurvensituationen in Frage. Während auf systemseitige Bremsengriffe bereits mit der Ausführung von Beschleunigungsmanövern angemessen reagiert werden kann, erfordern ungewollte Beschleunigungseingriffe gegebenenfalls auch die Ausführung von Lenkmanövern. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Fahrsituation derart gestaltet ist, dass eine Kollision mit Umgebungsobjekten nicht mehr durch ein einfaches Bremsmanöver verhindert werden kann.

Für die Gestaltung geeigneter Prüfscenarien im Kontext teilautomatisierter Fahrfunktionen legen die oben dargestellten Überlegungen verschiedene Ansätze nahe. Zum einen stellt sich die Frage, inwieweit sich die Erkenntnisse aus dem Bereich der Lenkeingriffe auf die Darbietung ganzer Eingriffskombinationen übertragen lassen. Da sich für die Bewertung lateraler Eingriffe ein Engstellenszenario als besonders effektiv erwiesen hat, sollte geklärt werden, ob die Existenz zusätzlicher Eingriffe in die Längsführung die Verwendung weiterer Szenarien erfordert. Im Falle von Eingriffskombinationen mit Lenkeingriffen und positiver Beschleunigung sind besondere Auswirkungen in Kurvensituationen denkbar. Darüber hinaus kann die Ausführung von Fahrstreifenwechselmanövern im Vergleich zu alleinigen Lenkeingriffen umfangreichere Reaktionen erfordern und veränderte Bewertungen mit sich bringen. Zum anderen stellt sich vor dem Hintergrund des Fahrscenarios die Frage nach den Eingriffsrichtungen. Da bereits für alleinige Lenkeingriffe innerhalb des Kurvenscenarios Unterschiede in Abhängigkeit von der Eingriffsrichtung festgestellt werden konnten, sind vergleichbare oder stärkere Effekte für ganze Eingriffskombinationen denkbar. Um ein möglichst umfassendes Bild der Auswirkungen zu erlangen, bietet sich daher die Analyse aller möglichen Richtungskombinationen innerhalb verschiedener Fahrscenarien an. Als Ausgangspunkt und für Vergleiche zwischen den Auswirkungen ein- und zweidimensionaler Eingriffe können die bereits untersuchten Szenarien verwendet werden.

2.6.3.3 Objektive Führungsgrößen der Störungsbewertungen

Im Bereich der lateralen Eingriffe sind in verschiedenen Arbeiten die Zusammenhänge zwischen Fahrzeugreaktionen und der menschlichen Wahrnehmung untersucht worden. Grundlegend ist hierbei der Gedanke, dass die bisher beleuchteten Faktoren zwar einen generellen Einfluss auf das Fahrgeschehen haben, dieser aber stark von den jeweiligen Fahrzeugeigenschaften abhängen kann. Ausgehend von den Auswirkungen unterschiedlich starker Lenkmomente stellte sich hierbei die Frage, inwieweit die Eingriffe anhand der am Lenkrad aufgebrauchten Kraft oder anhand resultierender Lenkrad- bzw. Fahrzeugreaktionen bewertet und erlebt wurden (Schmidt, 2009). Um diese Fragen zu beantworten, schlugen Neukum et al. (2001) sowie Schmidt (2009) vor, die Fahrerwahrnehmung in direktem Zusammenhang zu den jeweiligen Fahrzeugreaktionen zu betrachten. Dabei können die subjektiven Störungsbewertungen durch eine lineare Regression auf die fahrdynamischen Reaktionen bezogen werden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Tatsache, dass Einflüsse des fahrzeugspezifischen Übertragungsverhaltens (z. B. Eigenschaften des Fahrwerks oder Steifigkeit der Lenkung) weitgehend vernachlässigt werden können. Auf diese Art gewonnene Grenzwerte der subjektiv akzeptablen Fahrzeugreaktion können fahrzeugunabhängig verwendet werden. Sowohl Schmidt als auch die Autorengruppe um Neukum kategorisieren hierzu zunächst die auftretenden Fahrzeugreaktionen, (z.B. Zusammenfassung der auftretenden Gierreaktionen in 0,5er Schritten) um anschließend deren mittlere Bewertung zu berechnen.

Die bisher zu diesem Ansatz vorliegenden Ergebnisse sprechen deutlich für den Einfluss der fahrdynamischen Reaktion auf die Wahrnehmung des Fahrers und gegen eine dominante Auswirkung der am Lenkrad wahrgenommenen Ereignisse. Bei einer Gegenüberstellung der Auswirkungen identischer Lenkmomente in Fahrzeugen mit unterschiedlichen Lenkungsabstimmungen konnte Schmidt (2009) deutliche Unterschiede in den subjektiven Wahrnehmungen feststellen. Würden die wahrgenommenen Störungen in erster Linie von den Geschehnissen am Lenkrad abhängig sein, dürften diese Unterschiede nicht auftreten. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der maximale Lenkradwinkel als Maß für die durch den Fahrer zugelassene Auslenkung einen ebenso geringen Erklärungswert für die Störungsbewertungen besitzt. Im Bereich der fahrdynamischen Kennwerte treten hingegen deutlich stärkere Zusammenhänge auf. Während Schmidt die Spannweite der Querbefleunigung, also das Ausmaß der Beschleunigungsänderung, als wesentliche Determinante identifiziert, argumentieren Neukum et al. (2009) für Kennwerte der Gierrate. Um die Übertragbarkeit von Aussagen zu Auswirkungen unterschiedlicher Lenkeingriffe auf unterschiedliche Fahrzeuge zu untersuchen, setzten die Autoren einen Ansatz um, der dem von Schmidt beschriebenen Vorgehen nahe kommt. Hierbei wurden innerhalb einer Realfahrtstudie neben der Intensität des Lenkeingriffs auch dessen Gradient und das Übertragungsverhalten der Lenkung systematisch variiert. Durch die Verwendung einer elektrischen Servolenkung in Kombination mit einer Aktivlenkung konnten die Zusatzlenkmomente und der Lenkwinkel unabhängig vom eigentlichen Lenkverhalten variiert werden (Neukum et al., 2009).

Hierbei zeigten sich die bereits beschriebenen Wahrnehmungs- und Reaktionsmuster. Zudem konnten die Autoren zeigen, dass bei steilen Lenkmomentgradienten starke Unterschiede in Abhängigkeit von der Lenkungsübersetzung auftraten, während Vergleichbares für flache Gradienten nicht gefunden werden

konnte. Die Unterschiede bezogen sich dabei sowohl auf die Fahrzeugreaktion als auch auf die Störungsbewertungen der Probanden. Mit direkteren Lenkungsabstimmungen konnten dabei stärkere Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System festgestellt werden als es für indirektere Übersetzungen der Fall war. Dieser Effekt konnte hier ebenfalls mehrfach auch für identische Lenkmomentanforderungen gezeigt werden. Ein Bezug der maximalen Gierreaktionen auf die Störungsbewertungen zeigte hierbei, dass unabhängig von der Lenkungsübersetzung vergleichbare Urteilsfunktionen vorlagen. Eine valide Vorhersage der Fahrerwahrnehmung von lateralen Eingriffen kann damit auch anhand der maximalen Gierreaktion vorgenommen werden.

Die maximal Spannweite der Querbewegung und die maximale Gierrate sind stark voneinander abhängig, sodass Schmidt (2009) eine Korrelation von $R=.976$ feststellen konnte. Beide Maße eignen sich damit zur Vorhersage der Fahrerurteile in fast identischer Weise. Schmidt spricht in diesem Fall von nahezu redundanten Informationen. Diese Aussage wird durch die Tatsache gestützt, dass verschiedene Approximationsverfahren für beide Parameter nahezu identische Zusammenhänge zu den subjektiven Störungsbewertungen liefern. Eine lineare Approximation erreichte hierbei ein Güte von $R^2>0,87$, während für eine sigmoide Funktion ein Determinationskoeffizient von $R^2<0,92$ festgestellt werden konnte (Schmidt, 2009). Die geringfügig erhöhte Passung der sigmoiden Funktion wird dabei auf ihren höheren Freiheitsgrad zurückgeführt. Insgesamt zeigten sich hierbei kritische Störungsbewertungen ($>6,5$) für Gierraten ab einem Bereich von 5-6 °/s.

Im Bereich der lateralen Eingriffe können die wahrgenommenen Störungen eines Fehlerbildes damit sehr valide durch die maximale Gierrate und durch die maximale Spannweite der Querbewegung vorhergesagt werden. Vergleichbare Rückführungen subjektiver Urteile auf Kennwerte der Längsführung liegen nur eingeschränkt vor. Die in Kapitel 2.6.2 beschriebene Studie von Neukum et. al. (2009) stellt dabei eine Ausnahme dar. Hierbei werden die Extrema der Längsbewegungen sowie die minimalen TTC-Werte herangezogen, um die subjektiven Störungsbewertungen zu objektivieren. Kritische Urteile ($>6,5$) zeigten sich hierbei ab -4 m/s^2 bzw. für TTC-Werte unter 1,5 Sekunden. Da das Versuchssetting ausschließlich selbst ausgeführte Eingriffe und zudem nur Bremsmanöver fokussierte, stellt sich die Frage, inwieweit sich diese Ergebnisse einerseits auf automatische Eingriffe, andererseits auch auf positive Beschleunigungen übertragen lassen. Überdies muss für den Bereich der teilautomatisierten Funktionen der Frage nachgegangen werden, ob die Auswirkungen kombinierter Eingriffe ebenfalls durch eine Kombination bestimmter Führungsgrößen beschrieben werden müssen oder ob einzelne Maße eine ebenso gute Vorhersage erlauben. Zudem stellt sich die Frage, inwieweit die obigen Grenzwerte auch für gleichzeitig ausgeführte Lenk- und Bremsmanöver gelten.

3 Zentrale Fragestellungen

Im Folgenden werden die bisher beschriebenen Gedanken zunächst zusammengefasst, um im Anschluss die zentralen Fragestellungen der vorliegenden Arbeit zu formulieren. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zukünftige automatische Fahrfunktionen einen größeren Leistungsumfang durch die Integration bisheriger Einzelfunktionen bieten werden. Die gleichzeitige Beeinflussung der Quer- und Längsführung durch eine einzelne Instanz stellt dabei einen logischen Entwicklungsschritt dar, mit dem sowohl die Ausführung kurzfristiger Lenk-Bremsmanöver als auch die längerfristige Unterstützung des Fahrers gewährleistet werden können (vgl. Kapitel 2.1.2). Mittelfristig kann zudem nicht davon ausgegangen werden, dass sämtliche Fahrsituationen automatisch ausgeführt werden können. Darüber hinaus scheint eine systemseitige Warnung vor diesen Situationen mit einem deutlichen zeitlichen Abstand innerhalb eines absehbaren Zeitraums nicht wahrscheinlich. Derartige Fahrfunktionen müssen nach der aktuellen BAST-Nomenklatur als teilautomatisierte Systeme klassifiziert werden (vgl. Kapitel 2.1.1).

Die Nutzung von teilautomatisierten Funktionen ist mit konkreten Anforderungen an den Fahrer verbunden: Zum einen muss eine dauerhafte Überwachung der Funktion gewährleistet sein. Zum anderen muss der Fahrer jederzeit zu einer unmittelbaren Übernahme der Fahraufgabe in der Lage sein. Als dritte neue Aufgabe kommt, im Falle von unerwünschten oder fehlerhaften Eingriffen, die Übersteuerung der Fahrfunktion hinzu. Die oben genannte Überwachungsaufgabe kann dabei als Voraussetzung für die beiden letztgenannten Fahreraufgaben gesehen werden (vgl. Kapitel 2.3).

Eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Überwachung der Fahrfunktion ist ein angemessenes Situationsbewusstsein des Fahrers. Das Situationsbewusstsein kann durch die Nutzung einer teilautomatisierten Fahrfunktion sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden. Die Befundlage hierfür ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht eindeutig. Positive Effekte werden durch eine verminderte Beanspruchung und dadurch frei werdende kognitive Ressourcen erwartet. Negative Effekte können auftreten, indem basale Kontrollschleifen aus der Handlungsregulation entfernt und damit höhere Kontrollprozesse erschwert werden (vgl. Kapitel 2.4.2).

Obwohl Analysen der Beherrschbarkeit vor diesem Hintergrund als notwendig erscheinen, stehen hierbei weniger die zugrundeliegenden psychischen Prozesse im Vordergrund. Untersuchungsansätze, die Fragen der „Controllability“ beleuchten, fokussieren eher das Fahrerverhalten und nehmen eine Objektivierung subjektiver Beherrschbarkeitsbewertungen vor. Unter formalen Gesichtspunkten wird hierbei insbesondere die Betrachtung von Systemgrenzen und möglichen Systemfehlern gefordert (vgl. Kapitel 2.6.1). Für den Bereich der teilautomatisierten Systeme kann eine Betrachtung von Systemgrenzen durch eine plötzliche Deaktivierung zuvor automatisch ausgeführter Fahraufgaben ohne zeitliche Reserve erfolgen (vgl. Kapitel 2.6.2). Systemfehler können hingegen durch die Darbietung von Fehlerbildern untersucht werden (vgl. Kapitel 2.6.3). Für den Bereich der teilautomatisierten Fahrfunktionen kann davon ausgegangen werden, dass die Reaktion auf kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung beanspruchender wirkt, als es für eindimensionale Eingriffe der Fall ist. Damit stellen sich zunächst folgende Fragen:

1. Wie erleben und bewerten Fahrer Systemgrenzen, die in Form einer unmittelbaren Deaktivierung einer teilautomatisierten Fahrfunktion dargeboten werden?
2. Wie erleben und bewerten Fahrer mögliche Systemfehler, die in Form kombinierter Eingriffe in die Quer- und Längsführung dargeboten werden?
3. In welchem Verhältnis stehen diese Reaktionen im Vergleich zu den Auswirkungen von eindimensionalen Eingriffen?

Unter methodischen Gesichtspunkten kann zudem dem Vergleich beider systembasierten Ereignisse nachgegangen werden. Dieser Vergleich bietet die Möglichkeit, „Worst-Case-Ereignisse“ zu identifizieren und folgende Untersuchungen ökonomischer zu gestalten:

4. Wie verhalten sich die Auswirkungen von Systemgrenzen und möglichen Systemfehlern zueinander?

Darüber hinaus hat sich das Untersuchungsszenario sowohl für die Betrachtung von Übernahmeszenarien als auch für die Analyse von Fehlerbildern als relevant erwiesen. Im Bereich der Übernahmen können für regel- und wissensbasierte Verhaltensweisen, wie sie für Fahrstreifenwechsel oder Richtungsentscheidungen erforderlich sind, erhöhte Anforderungen festgestellt werden. Im Bereich der lateralen Eingriffe scheinen Engstellen die Anforderungen effektiver Prüfszenarien besonders gut zu erfüllen, während Kurvensituationen hier nur wenig zusätzliche Erkenntnisse liefern (vgl. Kapitel 2.6.3.2). Für den Bereich der longitudinalen Eingriffe sind hingegen nur wenige systematische Prüfsituationen bekannt. Daher sollen mögliche Einflüsse des Fahrscenarios in der vorliegenden Arbeit beleuchtet werden:

5. Welche Fahrscenarios eignen sich in besonderem Maße, um die Auswirkungen von Übernahmesituationen und kombinierten Eingriffen in die Quer- und Längsführung zu untersuchen? Unterscheiden sich diese Szenarien von den bisher bekannten Situationen?

Für die Bewertung von zusätzlichen Lenkmomenten haben sich verschiedene Eigenschaften der Eingriffe als besonders einflussreich erwiesen (vgl. Kapitel 2.6.3.1). Dazu gehören insbesondere der Gradient und die Intensität der Lenkmomente. Für den Bereich der kombinierten Eingriffe ist ebenfalls davon auszugehen, dass einzelne Charakteristika bzw. deren spezifische Ausprägung die Beherrschbarkeit beeinflussen. Die Intensität der Eingriffe sowohl im lateralen auch als auch im longitudinalen Bereich steht vor dem Hintergrund der Übersteuerbarkeit grundsätzlich im Mittelpunkt des Interesses. Für Lenkeingriffe lassen sich die Auswirkungen der Eingriffsstärke besonders gut anhand hoher Gradienten untersuchen, sodass in einem ersten Schritt eine systematische Variation der Intensität bei konstantem Gradienten untersucht werden sollte. Für die Längsführung ist ebenfalls davon auszugehen, dass unmittelbare Eingriffe (Beschleunigungen oder Verzögerungen) die Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System besser abbilden als graduelle Steigerungen. Vor diesem Hintergrund soll die Rolle der Intensität von kombinierten Eingriffen untersucht werden:

6. Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Intensitäten der Quer- und Längskomponente von kombinierten Eingriffen auf das Verhalten und Erleben von Fahrern?

Neben der Intensität kann die Richtung der Eingriffe einen besonderen Einfluss auf die Beherrschbarkeit haben (vgl. Kapitel 2.6.3.2). Für kombinierte Eingriffe ist hierbei vor allem die Richtung der longitudinalen Komponente interessant, da mögliche Unterschiede zwischen positiven und negativen Eingriffen innerhalb dieser Rahmenbedingungen noch nicht untersucht wurden. Zudem steht die Richtung der Eingriffe in direktem Zusammenhang zu den oben angesprochenen Fahrszenarien. Im Bereich der lateralen Eingriffe konnten anhand von Kurvenszenarien geringfügige Richtungsabhängigkeiten festgestellt werden, sodass sich eine Analyse der Auswirkungen von Eingriffsrichtungen von zweidimensionalen Eingriffen anbietet:

7. Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Eingriffsrichtungen bzw. Richtungskombinationen auf die Beherrschbarkeit von kombinierten Eingriffen in die Längs- und Querführung?

Neben den Charakteristika der eigentlichen Eingriffsbilder erweisen sich die resultierenden Fahrzeugreaktionen als entscheidend für die wahrgenommene Störung. Die Identifikation fahrzeugunabhängiger Führungsgrößen ermöglicht dabei die Bereitstellung genereller Grenzwerte (vgl. Kapitel 2.6.3.3). Für den Bereich der lateralen Eingriffe konnte gezeigt werden, dass Kennwerte der Gierrate und der Querschleunigung eine valide Vorhersage des subjektiven Erlebens ermöglichen. Für die longitudinale Komponente sind ebenfalls Kennwerte der Längsbeschleunigung zu erwarten, wenngleich für diesen Bereich deutlich weniger Erkenntnisse vorliegen. Inwieweit das subjektive Erleben von kombinierten Eingriffen durch bisher bekannte, einzelne Führungsgrößen oder durch eine Kombination verschiedener Maße möglich ist, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht untersucht:

8. Durch welche Führungsgröße(n) lässt sich die subjektiv wahrgenommene Störung durch kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung beschreiben und vorhersagen?

Die hier beschriebenen Fragestellungen werden im Folgenden anhand einer Simulatorstudie und einer Studie im Realfahrzeug untersucht. Die jeweiligen Versuchsanordnungen und das konkrete Vorgehen werden hierbei in direktem Zusammenhang mit den Ergebnissen dargestellt (Kapitel 4 und 5). Da in beiden Studien zum Teil identische Maße zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion verwendet werden, erfolgt eine zentrale Darstellung der Kennwerte innerhalb des folgenden Kapitels.

4 Auswirkung von Systemeingriffen, Deaktivierungen und des Fahrszenarios auf das Fahrerverhalten

4.1 Ziel und Fragestellung

Um die Auswirkungen des Fahrszenarios und den Einfluss verschiedener Systemzustände auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu untersuchen, wurden im Rahmen einer Simulatorstudie verschiedene Versuchsbedingungen realisiert und durch Normalfahrer bewertet¹. Hauptziel der Studie war die Identifikation sensibler Fahrszenarien. Ein weiteres Interesse bestand in der Frage, in welchem Verhältnis die Auswirkungen kombinierter Quer- und Längseingriffe zu unmittelbaren Systemdeaktivierungen, wie sie im Falle von Übernahmesituationen auftreten können, stehen (vgl. Kapitel 3).

4.2 Methodik

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Versuchsmethodik der Simulatorstudie. Dabei werden zunächst Einzelheiten des Versuchsaufbaus und des Designs beschrieben. Kapitel 4.2.3 gibt zudem einen Überblick über die verwendeten Maße zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Um Mehrfachdarstellungen zu vermeiden, werden hierbei ebenfalls die Maße der in Kapitel 5 beschriebenen Realfahrtstudie erläutert. Im Anschluss daran erfolgt eine Beschreibung der Stichprobe und der Analyseverfahren.

4.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Untersuchung wurde in einem feststehenden Fahrsimulator der Volkswagen AG Konzernforschung durchgeführt. Die nachgebildete Fahrerkabine des Simulators beinhaltete die üblichen Ausstattungen eines Pkws wie Fahrersitz mit Sicherheitsgurt, Mittelkonsole, Handbremse, Automatikschaltung, Lenkrad sowie Gas- und Bremspedal. Zudem konnte über einen Bildschirm hinter dem Lenkrad ein Kombiinstrument mit Drehzahl- und Geschwindigkeitsmesser simuliert werden. Zur Bewertung einer quer- und längsführenden Assistenzfunktion wurde ein entsprechender Regelalgorithmus in das Fahrdynamikmodell implementiert. Die Steuerung des Systems erfolgte durch Bedieneingaben auf dem Lenkrad bzw. durch Betätigung des Bremspedals. Bei Aktivierung wurde die Fahrzeugsteuerung durch aktive Eingriffe in die Längs- und Querverführung des Ego-Fahrzeugs automatisch ausgeführt. Analog zu heutigen Abstandsregeltempomaten wurde die aktuell gefahrene Geschwindigkeit als Setzgeschwindigkeit übernommen und der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen automatisch eingehalten. Mit Aktivierung der längsführenden Fahrerunterstützung erfolgte gleichzeitig die Aktivierung der Querverführung. Im Gegensatz zu nur temporär wirksamen Spurhalteassistenten wurde hier eine mittenzentrierte Spurführung umgesetzt. Spurkorrekturen bzw. das Aufbringen von Lenkkräften erfolgten demnach nicht temporär bei drohenden Fahrstreifenüberschreitungen, sondern kontinuierlich und orientiert an der Fahrstreifenmitte.

Die optischen und akustischen Status- und Interaktionsausgaben der teilautomatisierten Fahrfunktion erfolgten über die Soundausgabe bzw. über das im Versuchsaufbau integrierte Kombi-Display. Bei Aktivierung des Systems erfolgte eine einmalige Textausgabe („Quer- und Längsführung aktiviert“) sowie ein dauerhaft eingeblendetes Statussymbol. Beim manuellen Abschalten des Systems (durch

¹ Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse sind zum Teil innerhalb des Aktiv-Abschlussberichts sowie im Tagungsband der Tagung „Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit 2012“ (Kleen & Vollrath, 2012) veröffentlicht.

Bedieneingaben über das Lenkrad) erlosch das Symbol und eine einmalige Textausgabe bestätigte die Deaktivierung („Quer- und Längsführung deaktiviert“). Analog zu aktuellen Auslegungen von längsführenden Assistenzfunktionen führte die Betätigung der Bremse zu einer sofortigen Deaktivierung des gesamten Systems sowie zur Ausgabe der beschriebenen Rückmeldung. Eine Betätigung des Gaspedals führte zu einer kurzfristigen Übersteuerung der automatischen Längsführung. Systemgrenzen bzw. Deaktivierungen, die durch die Leistungsfähigkeit der Assistenzfunktion begründet waren, wurden durch optisch-akustische Übernahmeaufforderungen rückgemeldet. Der dabei ausgegebene Warntext auf dem Kombi-Display („Übernehmen!“) wurde durch einen deutlich hörbaren Warnton für die Dauer von einer Sekunde begleitet.

4.2.2 Versuchsdesign und Umsetzung der Fahrszenarien

Um den Einfluss plötzlicher Deaktivierung und spontaner Systemeingriffe untersuchen zu können, wurde der „Systemzustand“ als Zwischensubjektfaktor in die Untersuchung aufgenommen. In der ersten von zwei Versuchsgruppen wurden die Teilnehmer der Studie mit einer plötzlichen Deaktivierung des Systems konfrontiert (Gruppe 1: „Übernahmeaufforderung“). Probanden der zweiten Versuchsgruppe (Gruppe 2: „Systemeingriff“) wurden einem kombinierten Eingriff in die Längs- und Quersführung ausgesetzt, auf den mit entsprechenden Bedieneingaben zu reagieren war². Obwohl sich beide systembasierten Ereignisse deutlich voneinander unterscheiden, soll hiermit dennoch ein grundsätzlicher Vergleich des Erlebens und Verhaltens ermöglicht werden. Da sich die Anforderungen an die Reaktionen des Fahrers deutlich unterscheiden, bietet sich hier zumindest ein Vergleich der subjektiven Auswirkungen an (siehe Kapitel 4.5.3).

Um den Einfluss der Fahrszenarien zu untersuchen, wurden in dieser Studie vier verschiedene Fahrszenarien umgesetzt. Die Fahrsituationen gehen zum Teil auf die oben dargestellten Erkenntnisse zur Rolle des Szenarios zurück, richten sich jedoch auch an den spezifischen Erfordernissen der teilautomatisierten Fahrfunktion aus. Da die betrachtete Funktion primär für den höheren Geschwindigkeitsbereich konzipiert ist (vgl. Kapitel 4.2.1), wurden Autobahn-Szenarien simuliert (siehe Abbildung 11). Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Versuchsbedingungen der Simulatorstudie.

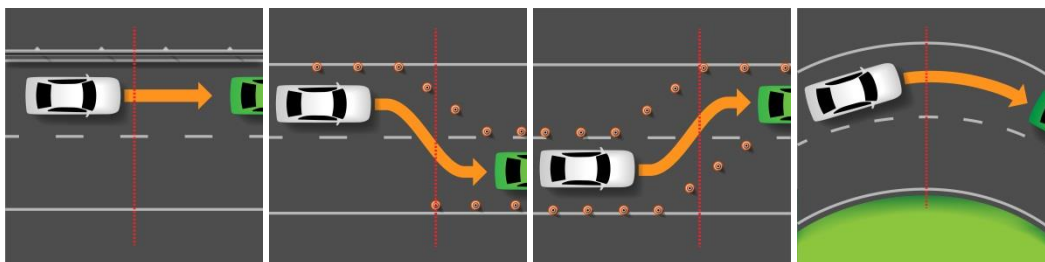


Abbildung 11: Darstellung der Fahrszenarien aus der Simulatorstudie. Teilnehmer der Studie durchfuhren ein Autobahnsszenario und wurden an vier Auslösepositionen (gestrichelte Linie) mit plötzlichen Deaktivierungen oder unerwarteten Systemreaktionen konfrontiert (von links nach rechts): Geradausfahrt, Baustelleneinfahrt, Baustellenausfahrt und Kurvenszenario.

²Der hier dargestellte Versuchsablauf wurde im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit beschrieben. Hierbei wurden die Versuchsidee, die Fragestellung und die Versuchsanordnung vorgegeben. Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wurden subjektive Daten ausgewertet, die nicht Gegenstand der hier dargestellten Analysen sind: Liebing, 2009, Ein Untersuchungsansatz zur Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen, nichtveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität Braunschweig

Die Geradeausfahrt entsprach einem normalen Autobahnscenario mit üblicher Fahrstreifenbreite von 3,5 m und soll als Ausgangspunkt für weitere Analysen dienen. Auf die Simulation von Umgebungsverkehr wurde in der gesamten Untersuchung verzichtet. In allen Versuchsbedingungen wurde jedoch ein Führungsfahrzeug simuliert, dem in einem konstanten Abstand von ca. 25 m gefolgt werden sollte. Die Existenz eines weiteren vorherfahrenden Verkehrsteilnehmers sollte neben den lateralen Anforderungen auch Aufgaben an die Fahrzeuglängsführung stellen. Die Aufgabe des Fahrers bestand damit in einer Folgefahrt und beinhaltete einfache Stabilisierungsaufgaben.

Die beiden Baustellenscenarien zeichneten sich durch eine Sperrung des linken Fahrstreifens und eine verengte rechte Fahrbahn aus. Die anfangs noch auf dem linken Fahrstreifen fahrenden Probanden wurden instruiert, durch einen Wechsel auf die rechte Fahrbahn in die Baustelle einzufädeln. Die Sperrung des linken Fahrstreifens und die Verengung des rechten Fahrstreifens bestanden aus simulierten Baustellenbaken. Die Aufschaltung der Übernahmeaufforderung und des Systemeingriffs erfolgten während des Fahrstreifenwechsels innerhalb der trichterförmigen Einfahrt in die Baustelle. Die Einfahrt in das Baustellenszenario vereint verschiedene Anforderungen der unter 2.1 besprochenen Aspekte. Zum einen erforderte die Einfahrt in die mit Baustellenbaken versehene Strecke ein Lenkmanöver. Weiterhin wurde der rechte Fahrstreifen durch die seitlichen Begrenzungen verengt. Einflüsse der lateralen Eingriffskomponente sollten damit besonders gut sichtbar gemacht werden (vgl. Kapitel 2.6.3.2). Aus Sicht des Fahrers stellt dieses Szenario damit nicht nur Anforderungen an die Fahrzeugstabilisierung, sondern ebenso an die Führungsebene (Damböck et al., 2012, vgl. Kapitel 2.6.2). Anforderungen dieser Art werden mit dem Einsatz höherer kognitiver Ressourcen verbunden (vgl. Kapitel 2.2). Aufgrund der Komplexität von Baustellenscenarien kann zudem davon ausgegangen werden, dass die erschwerte Umfelderkennung das Auftreten von Systemgrenzen wahrscheinlicher macht.

Für den Bereich der Baustellenausfahrt wurde eine abgewandelte Systemreaktion umgesetzt, die weitere Vergleiche ermöglichen soll. Mit dem Erreichen der Auslöseposition wurde hier ein Lenkmoment in Richtung der rechten Fahrbahnbegrenzung und einer simultanen Verzögerung aufgeschaltet. Die an dieser Stelle umgesetzten Eingriffe verhalten sich den übrigen Fehlerbildern entgegengesetzt und greifen die Rolle der Eingriffsrichtung in der Bewertung von teilautomatisierten Eingriffen auf (siehe Kapitel 4.4). Die Auslösung erfolgte analog zum Einfahrmanöver innerhalb der trichterförmigen Ausfahrt während des Wechsels vom rechten auf den linken Fahrstreifen. Auch dieses Szenario sollte aufgrund seiner Gegebenheit Anforderungen an die Führungsebene stellen und dem Szenario der Geradeausfahrt überlegen sein.

Das Kurvenszenario wurde im Rahmen einer simulierten Autobahnabfahrt umgesetzt. Die Probanden durchfuhren hierbei eine Rechtskurve, an deren Scheitelpunkt die Aufschaltung der Eingriffe bzw. die Deaktivierungen erfolgten. Dieses Kurvenmanöver wurde mit einer niedrigeren Geschwindigkeit (50 km/h) als die übrigen Verkehrssituationen absolviert. Auch dieses Szenario stellt insgesamt eher Anforderungen an die Führungsaufgabe des Fahrers. Werden die in Kapitel 2.6.3.1 dargestellten Erkenntnisse zugrunde gelegt, sollten sich innerhalb eines Kurvenscenarios Einflüsse der lateralen Eingriffsrichtung besonders gut zeigen lassen, ohne dass jedoch Effekte der Intensität deutlich

hervorstechen sollten. Für die vorliegende Studie stellt sich jedoch zunächst die Frage, ob sich die Auswirkungen einer zusätzlich dargebotenen longitudinalen Eingriffskomponente innerhalb eines Kurvenszenarios besonders gut beobachten lassen. Die Auswirkungen von systematisch variierten Intensitäten und Eingriffsrichtungen werden in Kapitel 5 besprochen.

Tabelle 4: Umsetzungen der systembasierten Ereignisse in den vier Fahrplanszenarios „Geradeausfahrt“, „Baustelleneinfahrt“, „Baustellenausfahrt“ und „Kurve“.

	Übernahmeaufforderung (Gruppe 1)		Kombinierter Eingriff in die Quer- und Längsführung (Gruppe 2)	
	Manipulation der Querführung	Manipulation der Längsführung	Manipulation der Querführung	Manipulation der Längsführung
Geradeausfahrt			Lenkeingriff nach links	positive Beschleunigung
Baustelleneinfahrt	unmittelbare Deaktivierung	Deaktivierung (Motorbremse)	Lenkeingriff nach links	positive Beschleunigung
Baustellenausfahrt			Lenkeingriff nach rechts	Verzögerung
Kurvenfahrt			Lenkeingriff nach links	positive Beschleunigung

Die Teilnehmer beider Versuchsgruppen wurden mit dem jeweiligen Ereignis (Übernahmeaufforderung oder Systemeingriff) in jedem Fahrplanszenario einmal konfrontiert und erlebten die Systemreaktion ihrer Gruppe insgesamt vier Mal. Da die Versuchstrecke in ihrer Abfolge nicht variabel war (Geradeausfahrt: Position 1, Einfädeln in die Baustelle: Position 2, Verlassen der Baustelle: Position 3, Kurvenfahrt: Position 4), wurde zur Kontrolle der Reihenfolgeeffekte das Auftreten der Ereignisse in vier Subgruppen permutiert dargeboten. Im direkten Anschluss an die Auslösung der Systemreaktionen wurden die Versuchsfahrten abgebrochen und die subjektiven Störungsbewertungen erhoben.

Dieses Vorgehen erlaubt folgende Gegenüberstellungen:

1. Vergleich der Auswirkungen zwischen Übernahmeaufforderungen und kombinierten Eingriffen in die Quer- und Längsführung,
2. Vergleich der Auswirkungen, die durch die vier unterschiedlichen Fahrplanszenarios verursacht werden,
3. Vergleiche der Auswirkungen beider systembasierten Ereignisse innerhalb der vier Szenarios zur Identifikation von Situationen, die sich besonders gut für die Bewertung von Übernahmeszenarios oder kombinierten Eingriffen eignen,
4. Vergleich der Auswirkungen, die sich auf die longitudinale Eingriffsrichtung zurückführen lassen, indem die Fahrerreaktionen der beiden Baustellenszenarios gegenübergestellt werden.

4.2.3 Maße zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Aussagen über die Beherrschbarkeit von Eingriffen in die Quer- und Längsführung setzen die Beschreibung der Mensch-Maschinen-Interaktion während und nach der Darbietung systembasierter

Eingriffe voraus. In bisherigen Arbeiten zu der Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen wurden zu diesem Zweck verschiedene Maße entwickelt, die eine Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für Betrachtungsebenen unterschiedlicher Detailliertheit erlauben (vgl. Kapitel 2.1). Im Folgenden werden Maße, die sich zur Beschreibung der Fahrer- und Fahrzeugreaktionen bei kombinierten Eingriffen ins Fahrgeschehen eignen, dargestellt.

Als Bewertungsgrundlage stehen verschiedene subjektive und objektive Maße zur Verfügung. Um die Auswirkungen von systembasierten Ereignissen auf das subjektive Erleben von Fahrern zu messen, hat sich die Störungsbewertungsskala nach Neukum (2003, vgl. Abbildung 10) als effektives Instrument erwiesen (Schmidt, 2009; Neukum et al., 2009; Breuer, 2009). Zur Beurteilung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion wird hier die subjektiv empfundene Beeinträchtigung der Fahrzeugführung erfragt und anhand einer zehnstufigen Skala bewertet. Die Skala zur Störungsbewertung zeichnet sich durch eine klare Trennung von „störenden“ und „gefährlichen“ Bewertungskategorien aus und erlaubt so eine nachvollziehbare Identifikation von Interaktionen, die über eine „unangenehme“ Beeinträchtigung des Fahrens hinausgehen. Aktionen, die die Toleranzgrenze des Fahrers überschreiten, werden hierbei mit Urteilen oberhalb der Stufe sechs („Störung des Fahrens“) bewertet. Als oberste Kategorie steht zudem die Bewertungsstufe „Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar“ zur Verfügung. Berechnungen von Liebing (2009) zur Vergleichbarkeit und Validität dieser Skala zeigen lediglich einen mittleren Zusammenhang mit Instrumenten zur Messung der subjektiven Beanspruchung wie der Rating Scale of Mental Effort (RSME, Zijlstra & van Doorn, 1985, Korrelation nach Pearson: $R=0.765$, $p<0.001$). Diese mittelmäßige Korrelation deutet darauf hin, dass sich die subjektiv empfundene Beeinträchtigung des Fahrens nur teilweise mit dem Beanspruchungskonstrukt der RSME überschneidet und ihre Bewertung zumindest zum Teil unabhängig davon erfolgt.

Neben den subjektiven Bewertungen von assistenzbasierten Eingriffen werden, insbesondere im Bereich der Querführung, verschiedene Lenkungsparameter zur Beschreibung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion herangezogen. Da es darum geht, zu beschreiben, wie gut es dem Fahrer gelingt, den unerwünschten Eingriff im Bereich der Querführung unter Kontrolle zu bekommen, wird der maximal vom Fahrer zugelassene Lenkradwinkel nach Darbietung eines Lenkmoments herangezogen (Schmidt, 2009). Dieser Kennwert beschreibt das Ausmaß der durch den automatischen Eingriff verursachten Auslenkung und gibt Auskunft über die Fähigkeit des Fahrers, den Lenkungsausschlag zu begrenzen. Je später der Fahrer eingreift, umso stärkere Auslenkungen sind notwendig, um den störenden Eingriff zu kompensieren. Für die im Folgenden geschilderten Darstellungen wird dieses Maß ebenfalls verwendet, um die Folgen von kombinierten Quer- und Längseingriffen auf die Lenkaktivität von Fahrern zu untersuchen. Von besonderem Interesse sind hierbei Veränderungen des Lenkverhaltens, deren Ursache sich auf Eigenschaften der longitudinalen Eingriffskomponente zurückführen lassen. Hiermit sind z. B. größere zugelassene Auslenkungen gemeint, die sich auf die Darbietung eines Brems- oder Beschleunigungsmanövers zurückführen lassen. Denkbar wären z. B. erhöhte maximale Lenkradwinkel, die nur mit gleichzeitigen Beschleunigungen, nicht aber bei alleinigen Lenkeingriffen oder bei Kombinationen mit Verzögerungskomponenten auftreten. In diesem Fall würden Fahrer stärkere Auslenkungen zulassen, obwohl keine Veränderung der lateralen Komponente vorliegt. Die veränderte Fahrer-Fahrzeug-Interaktion des Lenkverhaltens wäre damit nicht auf die genuin laterale Komponente,

sondern auf die „entgegengesetzte“, longitudinale Komponente zurückzuführen. Da solche Verhaltensmuster erst mit teilautomatisierten Systemen festgestellt werden können, gilt diesen Effekten besondere Aufmerksamkeit. Zur Bestimmung des maximalen Lenkradwinkels wird der erste absolute maximale Lenkradwinkel (°) innerhalb einer Zeitspanne von zwei Sekunden nach Auslösung der Eingriffe extrahiert. Die maximalen Lenkradwinkel werden entsprechend der aufgeschalteten Eingriffsrichtung berücksichtigt (Darstellung des Betrags). Um eine Vergleichbarkeit der Auswirkungen zwischen verschiedenen Fahrszenarien wie der Kurve und der Geradeausfahrt zu ermöglichen, werden zudem die maximalen Lenkradwinkel jeweils um die Ausgangslage korrigiert. Die hierbei gewählte Vorgehensweise wird in direktem Zusammenhang mit den Ergebnisdarstellungen erläutert.

Um Aussagen über die Reaktionszeit zu ermöglichen, mit der Fahrer auf Lenkungseingriffe reagieren und diese begrenzen, wird der Zeitpunkt des oben beschriebenen Lenkradwinkel-Extremums analysiert. Im Folgenden wird hierzu die Zeitspanne zwischen der Auslösung der Eingriffskombinationen und der maximalen Auslenkung in Sekunden berechnet.

Um die Auswirkungen der Eingriffskombinationen auf die Längsführung zu beschreiben, können zudem Parameter der Pedalerie (Gas- und Bremspedal) herangezogen werden. Der maximale Pedalweg bzw. Gas- oder Bremspedaldruck ermöglicht Aussagen über die Heftigkeit der Fahrerreaktion im Bereich der Längsführung. Der Fokus dieser Maße liegt dabei auf der Qualität der Reaktion, die ausgeführt wird, um einen Eingriff zu begrenzen. Aufgrund der hier verfolgten Untersuchungsansätze (vgl. Kapitel 5.1) wird die maximale Bremsintensität als relevante Fahrerreaktion analysiert.

Zur Beschreibung der Fahrzeugreaktion, die nach der Darbietung von Eingriffen in die Fahraufgabe auftreten, hat sich die resultierende Gierrate (°/s) als aussagekräftiges Maß erwiesen. Für Eingriffe in die Querführung identifizieren Schmidt (2009) und Neukum (2009) die Drehbewegung um die Hochachse des Fahrzeugs als eigentliche Determinante der Fahrerwahrnehmung und führen die subjektiven Störungsbewertungen auf dieses Maß zurück (vgl. Kapitel 2.6.3.3). Breuer (2009) verwendet die Gierrate, um anhand von Expertenbewertungen tolerierbare Bremseingriffe festzulegen. Der Vorteil, den die Rückführung der Fahrerwahrnehmung auf resultierende Fahrzeugreaktionen bietet, liegt, wie bereits dargestellt, in der Bereitstellung fahrzeugunabhängiger Grenzwerte. Als Kennwert der Gierreaktion wird deren Spannweite für den Zeitraum nach der Aufschaltung von Eingriffskombinationen extrahiert. Mit der Verwendung der Spannweite anstatt des Extremwerts der Gierreaktion wird der Argumentation von Schmidt (2009) gefolgt, in der, entsprechend den Mechanismen der menschlichen Wahrnehmung, ein Maß zur Beschreibung der Veränderung empfohlen wird. Für die in Kapitel 5 beschriebene Realfahrtstudie wurde die Spannweite für einen Zeitraum von zwei Sekunden nach der Aufschaltung aus den jeweiligen Minimal- und Maximalwerten berechnet.

Analog zur Spannweite der auftretenden Gierreaktion kann die Spannweite der Längsbeschleunigung verwendet werden, um longitudinale Fahrzeugreaktionen zu beschreiben. Hierzu werden für einen Zeitraum von zwei Sekunden nach der Auslösung die Minimal- und Maximalwerte der auftretenden Längsbeschleunigung extrahiert.

Tabelle 5: Verwendete Maße zur Beschreibung der Beherrschbarkeit von systembasierten Ereignissen (kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung sowie Übernahmeszenarien) der in Kapitel 4 beschriebenen Simulator- und in Kapitel 5 dargestellten Realfahrtstudie.

	Realfahrtstudie	Simulatorstudie
Subjektive Störungsbewertungen	x	x
Maximaler Lenkradwinkel (°)	x	x
Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels (s)	x	x
Maximaler Bremspedalweg (cm)	x	x
Spannweite der Gierrate (°/s)	x	
Spannweite der Längsbeschleunigung (m/s ²)	x	

Im Folgenden werden zunächst die Auswirkungen von Fahr Szenarien und die Unterschiede zwischen Eingriffskombinationen und unmittelbarer Deaktivierung auf das Erleben und Verhalten von Normalfahrern analysiert. Da diese Bewertung im Rahmen einer Simulatorstudie vorgenommen wurde, gehen Kennwerte der resultierenden Fahrzeugreaktion hier nicht in die Analyse ein. Der Zusammenhang zwischen den wahrgenommenen Auswirkungen und den Veränderungen der Gierrate sowie der Längsbeschleunigung werden in Kapitel 6 besprochen.

4.2.4 Stichprobe

Zur Bewertung der Beherrschbarkeit beider systembasierten Ereignisse gingen die Datensätze von 59 Probanden in die Analyse ein. Abbildung 12 stellt die Alters- und Geschlechterverteilung der Stichprobe dar.

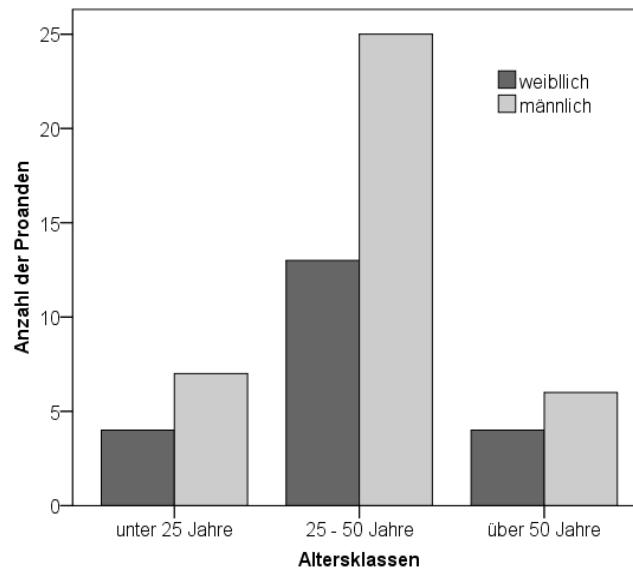


Abbildung 12: Alters- und Geschlechterverteilung der Stichprobe der Simulatorstudie.

Die Gruppe der 25- bis 50-Jährigen war mit 38 Probanden die am stärksten vertretene Altersgruppe (64% der Stichprobe). Die Gruppe der Probanden unter 25 Jahren stellten mit 11 Teilnehmern 19% der Stichprobe dar, die der über 50-Jährigen mit 10 Probanden 17%. Die Gesamtstichprobe setzte sich aus 38 Männern und 21 Frauen zusammen. Männer waren in allen drei Altersklassen ca. drei Mal häufiger vertreten als Frauen.

4.2.5 Analyseverfahren

Um die Auswirkungen des Systemstatus und der Fahrscenarios zu bestimmen, wurde eine multivariate Varianzanalyse mit Messwiederholungen berechnet. Das Fahrscenario wurde mit den Ausprägungen „Gerade“, „Baustelleneinfahrt“ und „Kurve“ in den Berechnungen berücksichtigt. Der Vergleich zwischen den Szenarien „Baustellenein-“ und „-ausfahrt“ erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt und wird in Kapitel 4.5.4 beschrieben. Als Zwischensubjektfaktor wurde der „Systemstatus“ mit den Ausprägungen „Übernahmeaufforderung“ und „Systemeingriff“ aufgenommen. Als abhängige Variablen wurden die subjektive Störungsbewertung, der maximale Lenkradwinkel (°), der Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels (s) und der maximale Bremspedalweg (cm) verwendet (vgl. Tabelle 5 und Kapitel 4.2.3).

Die Ergebnisse der multivariaten Tests werden nach Wilks-Lambda berichtet, die Ergebnisangaben der univariaten Tests erfolgen Greenhouse-Geisser-korrigiert. Post Hoc Tests wurden mit Bonferroni-Korrektur berechnet. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde insgesamt auf $\alpha=.05$ gesetzt.

4.3 Ergebnisse zu den Auswirkungen von Systemstatus und des Fahrscenarios

Das Fahrerverhalten und die Wahrnehmung der Prüfsituationen werden sowohl von den unterschiedlichen Fahrscenarios als auch durch die Art des systembasierten Ereignisses „Systemstatus“ beeinflusst. Die multivariate Testung zeigt einen globalen Effekt des Status und eine signifikante Interaktion zwischen Status und Fahrscenario (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse der multivariaten Tests. Das Fahrerverhalten und die subjektiv wahrgenommene Beherrschbarkeit der Prüfsituationen werden sowohl durch das Fahrscenario als auch durch den jeweiligen Systemstatus (Übernahmesituation oder Systemeingriff) beeinflusst.

	F	Hypothese df	Fehler df	Sig.
Fahrscenario	217.61	16	38	<.001
Systemstatus	19.59	8	46	<.001
Fahrscenario*Systemstatus	5.33	16	38	<.001

Subjektive Störungsbewertungen

Das subjektive Erleben der Probanden wird sowohl von dem jeweiligen Fahrscenario als auch durch das jeweilige Systemverhalten (Systemstatus) beeinflusst. Beide Faktoren wirken unabhängig voneinander auf die Wahrnehmung der Prüfsituation (Tabelle 7). Abbildung 13 zeigt die subjektiven Störungsbewertungen aller Probanden für das jeweilige Fahrscenario und den dargebotenen Status.

Tabelle 7: Ergebnisse der univariaten Tests und der Tests der Zwischensubjekteffekte für die subjektive Störungsbewertung.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrscenario	2	13.20	105.41	<.001
Systemstatus	1	29.44	53	<.001
Fahrscenario * Systemstatus	1.98	.18	53	.827

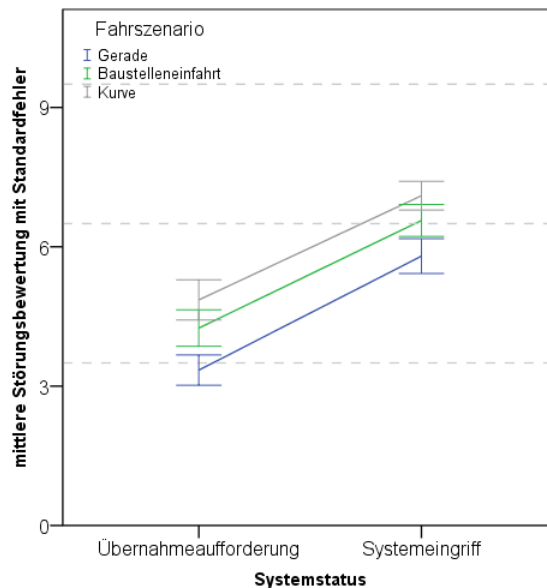


Abbildung 13: Subjektive Bewertung der Systemeingriffe für Übernahmeaufforderungen und Systemeingriffe in den Fahrszenarien „Gerade“, „Baustelleneinfahrt“ und „Kurve“.

Die Vergleiche von Eingriffen und Übernahmeaufforderungen zeigen klare Unterschiede in den Störungsbewertungen. Eingriffe in das Fahrgeschehen werden als deutlich störender erlebt und im Vergleich zu Deaktivierungen des Systems als schwerwiegender bewertet. Im Mittel bewegen sich die Urteile der Übernahmesituationen im unteren Bereich der Kategorie „Störung des Fahrens“ ($M_{\bar{U}} = 3.73$, $SD = 1.94$). Systemeingriffe werden zwar ebenfalls als „störend“ wahrgenommen, liegen aber mit mittleren Skalenwerten um 6 ($M_E = 6.03$, $SD = 2.03$) an der Grenze zur wahrgenommenen Gefährlichkeit und fallen damit deutlich kritischer aus.

Werden die Urteile aus den verschiedenen Fahrszenarien miteinander verglichen, zeigt sich ein zweigeteilter Befund. Die Geradeausfahrt geht im Vergleich zu den übrigen Szenarien mit den niedrigsten Störungsbewertungen einher ($M_G = 4.56$, $SD = 0.26$). Die Systemaktionen in den beiden übrigen Szenarien werden hingegen als störender bewertet. Sowohl das Kurvenszenario ($M_K = 5.45$, $SD = .027$) als auch die Baustelleneinfahrt ($M_B = 6.00$, $SD = 0.28$) setzen sich auf signifikantem Niveau von der Geradeausfahrt ab ($p_{G-K} < .001$, $p_{G-B} = .009$). Unterschiede zwischen der subjektiven Beanspruchung während der Einfahrt in eine Baustelle und einer Kurvenfahrt lassen sich hingegen nicht feststellen ($p_{B-K} = .188$). Da keine Wechselwirkung vorliegt, gelten diese Ergebnisse sowohl für Übernahmeaufforderungen als auch für die kombinierten Systemeingriffe. Die Geradeausfahrt erweist sich damit als weniger sensitiv für die Bewertungen beider systembasierten Ereignisse. Die Kategorie „Störung des Fahrens“ wird dabei in keiner der Fahrszenarien überschritten, wenngleich die Bewertungen der Baustelleneinfahrt und der Kurvensituation an der Grenze zu einer kritischen Beurteilung liegen. Unter subjektiven Gesichtspunkten können beide Szenarien als „Worst-Case-Fälle“ angesehen werden.

Zusammenfassend kann die Wahrnehmung der Prüfsituation in folgenden Punkten beschrieben werden:

- Sowohl das Fahrszenario als auch der dargebotene Systemstatus beeinflussen die Störungsbewertungen deutlich. Beide Faktoren wirken unabhängig voneinander auf die Wahrnehmung.
- Systemeingriffe werden unabhängig von dem jeweiligen Fahrszenario kritischer als Übernahmeaufforderungen wahrgenommen.
- Die Geradeausfahrt geht mit einer geringeren mittleren Störungsbewertung als die Baustelleneinfahrt und die Kurvensituation einher. Zwischen diesen beiden Szenarien finden sich keine Unterschiede. Das Baustellenszenario und die Kurvenfahrt können unter subjektiven Gesichtspunkten als „Worst-Case“-Szenarien angesehen werden.

Maximaler Lenkradwinkel

Ebenso wie die Störungsbewertungen werden die maximal zugelassenen Auslenkungen sowohl durch das Fahrszenario als auch durch den Systemstatus beeinflusst (siehe Tabelle 8). Im Unterschied zu den subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen wirken hier jedoch beide Faktoren wechselseitig auf den maximalen Lenkradwinkel.

Tabelle 8: Ergebnisse der univariaten Tests und der Test der Zwischensubjekteffekte für den maximalen Lenkradwinkel in Abhängigkeit des Systemstatus und des Fahrszenarios.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrszenario	1.31	87.60	59.23	<.001
Systemstatus	1	60.66	45	<.001
Fahrszenario * Systemstatus	1.31	4.33	45	.032

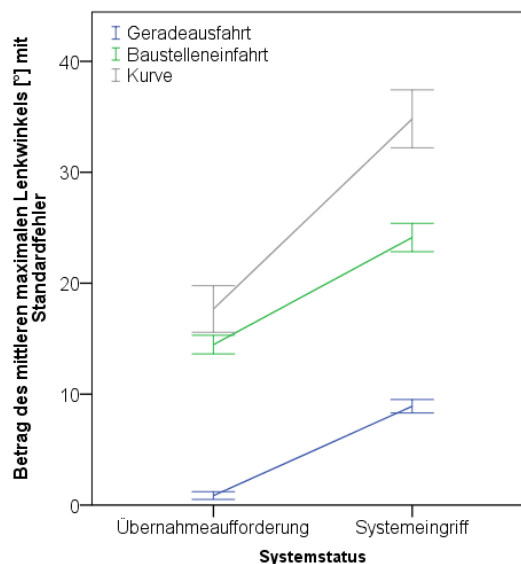


Abbildung 14: Darstellung der maximalen Lenkradwinkel in Abhängigkeit des Systemstatus und des Fahrszenarios. Die maximalen Lenkradwinkel wurden um eine Ausgangslage von 45° für das Kurvenszenario und um 10° für die Baustelleneinfahrt korrigiert. Dargestellt ist der Betrag des maximalen Lenkradwinkels. Je stärker die Werte von der 0°-Position abweichen, desto stärkere Auslenkungen werden infolge der systembasierten Ereignisse zugelassen.

Die Rangordnung der maximalen Lenkradwinkel in den Fahrszenarien entspricht nur in Teilen den subjektiven Störungsbewertungen (Abbildung 14). Als wichtigste Gemeinsamkeit beider Maße zeigen

sich die größeren Auswirkungen von Systemeingriffen. Ein Vergleich der zugelassenen Auslenkung für jedes der Fahrszenarien zeigt größere maximale Lenkradwinkel infolge der Fehlerbilder ($p_{GÜ-GS} < .001$, $p_{BÜ-BS} < .001$, $p_{KÜ-KS} < .001$). Eine Analyse der Auswirkungen in Abhängigkeit des Systemstatus zeigt im Vergleich zu den subjektiven Störungsbewertungen leichte Abweichungen der Muster. Für die Versuchsbedingung der Übernahmeaufforderung zeigen sich äußerst geringe Auslenkungen innerhalb der Geradeausfahrt ($M_{GÜ} = 0.85^\circ$, $SD = 1.48$). Da die Deaktivierung des Assistenzsystems in dieser Versuchsbedingung im Wesentlichen keine Rückstellkräfte erzeugte, ist davon auszugehen, dass eine problemlose Übernahme der Querführung erfolgte. Die mittleren Auslenkungen innerhalb des Baustellenszenarios sind im Vergleich zu Geradeausfahrt signifikant erhöht ($M_{BÜ} = 14.46^\circ$, $SD = 3.57$; $p_{GÜ-BÜ} > .001$). Da die Deaktivierung der Quer- und Längsführung mit einer Rückstellbewegung des Lenkrads einherging, tritt hier ein größerer maximaler Lenkradwinkel auf. Demgegenüber ist die zugelassene Auslenkung innerhalb des Kurvenszenarios zwar auf deskriptiver Ebene erhöht, ohne dass sich jedoch signifikante Differenzen zeigen ($M_{KÜ} = 18.65^\circ$, $SD = 9.34$; $p_{BÜ-KÜ} = .185$). Im Hinblick auf das Lenkverhalten zeigen sich für Übernahmeszenarien damit keine Unterschiede zwischen beiden Szenarien. Beide Fahrsituationen können, bezogen auf die zugelassene Auslenkung, als gleichermaßen sensitiv betrachtet werden.

Die maximalen Auslenkungen infolge der Systemeingriffe entsprechen weitestgehend dem Muster der Störungsbewertungen. Die Rangfolge der mittleren maximalen Lenkradwinkel zeigt die zugelassenen Auslenkungen ($M_{GE} = 24.12^\circ$, $SD = 6.87$) für die Geradeausfahrt, gefolgt von der Baustelleneinfahrt ($M_{BE} = 24.21^\circ$, $SD = 6.87$) und der Kurvensituation ($M_{KE} = 34.81^\circ$, $SD = 14.03$). Alle mittleren Lenkradwinkel setzten sich signifikant voneinander ab ($P_{Ge-Be} < .001$; $P_{Ge-Ke} < .001$; $P_{Be-Ke} < .001$). Ausgehend von den subjektiv wahrgenommenen Störungen (vgl. Abbildung 13) kann der überproportional erhöhte Mittelwert der Kurvensituation als auffällig angesehen werden. Während die Auswirkungen auf den Lenkradwinkel für die übrigen beiden Szenarien weitestgehend in einem vergleichbaren Verhältnis steigen, scheinen sich Systemeingriffe innerhalb von Kurven noch deutlicher von Übernahmeszenarien abzusetzen.

Zusammenfassend werden folgende Ergebnisse für die maximalen Auslenkungen festgehalten:

- Das Fahrszenario und der dargebotene Systemstatus wirken im Rahmen einer Interaktion auf die zugelassene Auslenkung.
- Systemeingriffe gehen in allen Fahrszenarien mit größeren maximalen Lenkradwinkeln einher und haben stärkerer Auswirkungen auf das Lenkverhalten als Übernahmeaufforderungen.
- Werden Fahrer mit Übernahmeszenarien konfrontiert, zeigen sich innerhalb der Geradeausfahrt äußerst geringe Auswirkungen auf das Lenkverhalten. Lenkreaktionen durch den Fahrer sind in dieser Situation unnötig und werden auch nicht vorgenommen. Die Auslenkungen in den übrigen Szenarien sind demgegenüber erhöht, ohne dass sich Unterschiede zwischen dem Baustellen- und dem Kurvenszenario zeigen. Anhand der maximalen Lenkradwinkel können beide Szenarien dieser Versuchsbedingung als gleichermaßen sensitiv bewertet werden.
- Die stärksten Auswirkungen auf den maximalen Lenkradwinkel zeigen sich für Systemeingriffe in Kurvensituationen.

Zeitpunkt der maximalen Auslenkung

Die Analyse der lenkradbezogenen Reaktionszeiten zeigt ebenfalls einen wechselseitigen Effekt von Fahrerszenario und Systemstatus. Beide Faktoren wirken nicht unabhängig, sondern im Rahmen einer Interaktion auf die Reaktionszeit (Tabelle 9).

Tabelle 9: Ergebnisse der univariaten Tests und der Test der Zwischensubjekteffekte für den Zeitpunkt der maximalen Lenkradauslenkung in Abhängigkeit des Systemstatus und des Fahrerszenarios.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrerszenario	1.74	33.04	92.38	<.001
Systemstatus	1	21.76	53	<.001
Fahrerszenario * Systemstatus	1.74	30.28	53	<.001

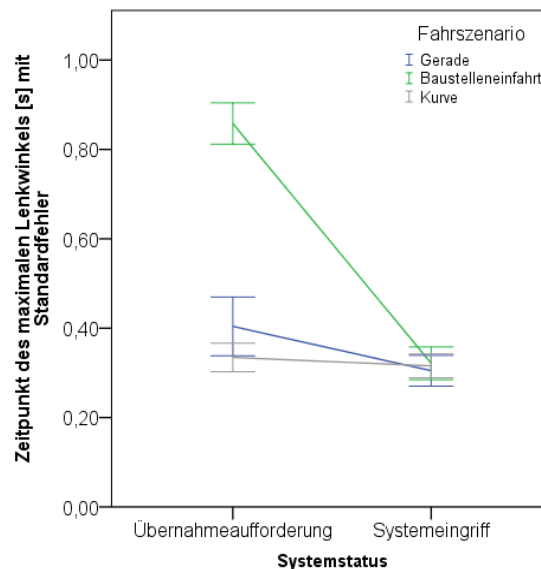


Abbildung 15: Darstellung der Zeitpunkte der maximalen Lenkradwinkel. Die Zeitpunkte der maximalen Auslenkung werden als lenkradbezogene Reaktionszeit interpretiert. Frühe Zeitpunkte weisen auf eine schnelle Begrenzung hin.

Für den Bereich der Übernahme-szenarios zeigen sich nur punktuell Unterschiede in den lenkradbezogenen Reaktionszeiten. Die mittlere Reaktionszeit des Baustellenszenarios ($M_{Bü} = 0.85s$, $SD = 0.25$; $p_{Gü-Bü} < .001$, $p_{Bü-Kü} < .001$) setzt sich dabei deutlich von den Reaktionen in den übrigen Szenarien ab (siehe Abbildung 15). Die maximalen Auslenkungen treten nur in dieser Versuchsbedingung deutlich verspätet auf. Die Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels innerhalb der einfachen Geradeausfahrt liegen bei ca. 400 ms ($M_{Gü} = 0.40s$, $SD = 0.35$), die der Kurvenfahrt bei ca. 380 ms ($M_{Kü} = 0.38s$, $SD = 0.16$).

Unter Berücksichtigung der zuvor diskutierten Ergebnisse ergeben sich damit zwei wichtige Aspekte. Zum einen werden die plötzlichen Übergaben des Kurvenszenarios vergleichbar schnell kontrolliert wie Übernahme-situationen innerhalb einer Geradeausfahrt. Dieser Aspekt gewinnt seine Bedeutung durch die erhöhten Störungsbewertungen und die erhöhten maximalen Lenkradwinkel des Kurvenszenarios.

Systembedingte Eingriffe dieser Art weisen auf subjektiver und verhaltensbezogener Ebene zwar auf eine erschwerte Beherrschbarkeit hin, werden aber sehr schnell kontrolliert. Zum anderen treten die Übernahmeszenarien innerhalb der Baustelleneinfahrt in den Vordergrund. Systembasierte Ereignisse dieser Art gehen gegenüber der Geradeausfahrt mit einer leicht erhöhten Störungsbewertung einher und weisen zudem erhöhte Auslenkungen auf. Darüber hinaus werden die rückstellbedingten Auslenkungen später als in den übrigen Szenarien kontrolliert ($M_{B\ddot{u}} = 0.86s$, $p_{B\ddot{u}-G\ddot{u}} < .001$; $p_{B\ddot{u}-K\ddot{u}} < .001$). Da Eingriffe dieser Art nicht in den Störungsbewertungen hervorstechen, zeigt sich damit ein zunächst unerwartetes Muster. Im Hinblick auf die Beherrschbarkeit dieser Situation kann dennoch von einer angemessenen Fahrerreaktion ausgegangen werden. Die subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen der Übergabesituationen liegen im unteren Bereich der Kategorie „Störung des Fahrens“ und damit deutlich unterhalb eines kritischen Urteils. Die lenkungsbezogenen Reaktionszeiten liegen im Mittel deutlich unter einer Sekunde und sprechen für adäquate Übernahmen der Fahraufgabe.

Die Analyse der Reaktionszeiten infolge der Systemeingriffe zeigt sehr schnelle Fahrerreaktionen in allen Fahrszenarien. Die mittlere Reaktionsdauer für alle drei Szenarien liegt bei ca. 310 ms ($M_e = 0.31s$, $SD = 0.14$), ohne dass sich Unterschiede zwischen den einzelnen Mittelwerten nachweisen lassen ($p_{Ge-Be} = .650$; $p_{Ge-Be} = .805$; $p_{Ge-Be} = .824$). Für das Szenario der Baustelleneinfahrt lassen sich damit deutlich verbesserte Reaktionen gegenüber den Baustellenszenarios feststellen ($p_{B\ddot{u}-Be} < .001$), während sich für die übrigen Szenarien keine Unterschiede zwischen den Status finden.

Die schnellen, lenkungsbezogenen Reaktionszeiten sprechen insgesamt für eine angemessene Beherrschbarkeit der lateralen Systemeingriffe. Insbesondere die bisherigen Befunde zu Eingriffen innerhalb des Kurvenszenarios können so relativiert werden. Fahrer bewerten Eingriffe in diesem Setting zwar als störend und lassen größere Auslenkungen zu, sind aber in der Lage, die Eingriffe in die Querführung genau so schnell wie weniger störende Fehlerbilder zu kontrollieren.

Die Ergebnisse zur lenkungsbezogenen Reaktionszeit können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Die lenkungsbezogene Reaktionszeit unterliegt ebenfalls einer Interaktion des Fahrszenarios und des Systemstatus.
- Zwischen den Reaktionszeiten der Übergabe innerhalb der Kurvensituation und der Geradeausfahrt lassen sich keine Unterschiede feststellen. Übergaben in der Kurvensituation gehen zwar mit erhöhten maximalen Lenkradwinkeln und Störungsbewertungen einher, werden aber sehr schnell kontrolliert.
- Systemübergaben innerhalb der Baustelleneinfahrt gehen im Vergleich zu den übrigen Szenarien mit späteren Begrenzungen der rückstellbedingten Auslenkungen einher. Da die tatsächliche Auslenkung nicht stark erhöht ist und die Störungsbewertungen weit unter kritischem Niveau bleiben, kann von einer angemessenen Beherrschbarkeit dieser Situation ausgegangen werden.
- Systemeingriffe werden in allen Fahrszenarien sehr schnell kontrolliert, ohne dass sich Unterschiede zwischen den Situationen feststellen lassen. Im Mittel treten hier Zeitpunkte der

maximalen Auslenkung von 310 Millisekunden auf. Für das Baustellenszenario lassen sich im Vergleich zu den Übergabeszenarien verbesserte Reaktionszeiten feststellen.

Maximaler Bremspedalweg

Die Analyse der Bremsreaktionen zeigt als longitudinales Verhaltensmaß Parallelen zu den oben beschriebenen Wahrnehmungs- und Verhaltensmustern. Die Intensität mit der Fahrer bremsen, unterliegt ebenfalls dem Zusammenspiel von Fahrszenario und Systemstatus (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Ergebnisse der univariaten Tests und der Tests der Zwischensubjekteffekte für den maximalen Bremspedalweg in Abhängigkeit des Systemstatus und des Fahrszenarios.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrszenario	1.95	146.8	103.82	<.001
Systemstatus	1	12.50	53	<.001
Fahrszenario * Systemstatus	1.95	4.32	53	.016

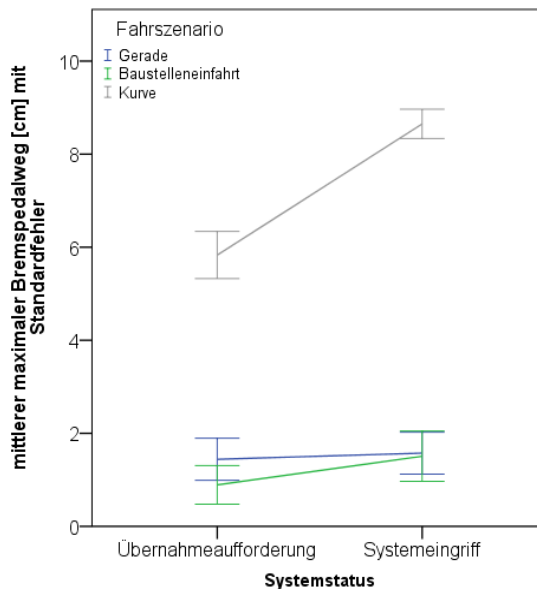


Abbildung 16: Darstellung der mittleren maximalen Bremspedalwege in Abhängigkeit des Systemstatus und des Fahrszenarios. Innerhalb des Kurvenszenarios treten, insbesondere mit Systemeingriffen, deutlich stärkere Bremsreaktionen auf.

Die Bremsreaktionen des Kurvenszenarios sind für beide Systemstatus deutlich erhöht und damit intensiver als in allen übrigen Versuchsbedingungen (siehe Abbildung 16). Die Kurvenfahrt erweist sich damit für beide Systemstatus als das Szenario mit den stärksten Bremsreaktionen ($M_{K\ddot{u}} = 5.83\text{cm}$, $SD = 2.73$; $M_{K_e} = 8.65$, $SD = 1.72$). Fahrer, die mit dem kombinierten Eingriff aus Beschleunigung und einem Lenkeingriff nach links konfrontiert wurden, reagieren hierbei zudem deutlich stärker als Probanden, die mit einem plötzlichen Wegfall der teilautomatisierten Unterstützung konfrontiert werden ($p_{K\ddot{u}-K_e} < .001$). Vergleichbare Unterschiede können für die übrigen Fahrszenarien nicht festgestellt werden. Die Bremsstärke, mit der Fahrer auf Übernahmeaufforderungen und kombinierte Systemeingriffe reagieren, unterscheidet sich weder in der einfachen Geradeausfahrt noch während der Einfahrt in die Baustelle auf signifikantem Niveau ($p_{G\ddot{u}-G_e} = .836$, $p_{B\ddot{u}-B_e} = .370$). Die Vergleiche der Bremsreaktionen innerhalb der

einzelnen Versuchsgruppen erbringen darüber hinaus keine weiteren Erkenntnisse. Abgesehen von den deutlich stärkeren Bremsreaktionen der Kurvenfahrten gegenüber den übrigen Szenarien können bei Übernahmeaufforderungen und Systemeingriffen keine Unterschiede zwischen der Geradeausfahrt und der Baustellensituation festgestellt werden.

Im Hinblick auf die longitudinale Reaktionsstärke können die Geradeausfahrt und die Einfahrt in eine Baustelle als vergleichbare Fahrszenarien bewertet werden. Allein die Reaktionen des Kurvenszenarios setzen sich ab und erlauben zudem eine Differenzierung der Intensitäten in Abhängigkeit des Systemstatus. Für das Kurvenszenario können damit neben den verbesserten Reaktionszeiten auch stärkere Bremsreaktionen festgestellt werden. Diese Reaktionen auf die longitudinale Eingriffskomponente erweisen sich besonders für die Systemeingriffe als wichtig und zeigen kompensatorische Handlungen, um Auswirkungen auf die Fahrzeuglängsführung zu begrenzen. Einschränkend muss in diesem Zusammenhang jedoch eine Besonderheit des Versuchssettings diskutiert werden. Da das Kurvenszenario innerhalb einer simulierten Autobahnabfahrt umgesetzt wurde, bestand zwischen dem Ego- und Führungsfahrzeug ein geringerer Abstand als in den übrigen Szenarien. Die intensiveren Bremsreaktionen können daher nicht ausschließlich auf die Besonderheit einer Kurvenfahrt zurückgeführt werden, sondern müssen zumindest teilweise auf die veränderten Abstandswerte zurückgeführt werden. Da dieses Szenario insgesamt mit einer geringeren Geschwindigkeit (ca. 50 km/h) absolviert wurde (ca. 100 km/h in den übrigen Szenarien), muss jedoch nicht von einer sehr starken Verzerrung ausgegangen werden.

Zudem sind die starken Bremsreaktionen in Übergabesituationen innerhalb der Kurvenfahrt zunächst nicht zu erwarten. Die systembedingte Übergabe der Fahraufgabe erforderte zunächst keinen direkten Bremsingriff des Fahrers, da mit der Deaktivierung der Quer- und Längsführung die verzögernde Wirkung der Motorbremse einsetzte. Die relativ starke Bremsreaktion kann als Vorsichtsmaßnahme im Falle von unerwarteten Systemmeldungen bzw. -verhaltensweisen interpretiert werden. Diese Verhaltensweisen erscheinen, insbesondere vor der bereits diskutierten geringen Distanz zum Führungsfahrzeug, als angebracht.

Damit ergibt sich folgende Zusammenfassung der Ergebnisse für den maximalen Bremspedalweg:

- Das Kurvenszenario setzt sich in beiden Systemaktionen deutlich von den übrigen Fahrszenarien ab. Die Bremsreaktionen sind hier weitaus stärker. Auf Systemeingriffe, die mit Beschleunigungen einhergehen, wird zudem stärker reagiert als auf Übernahmeaufforderungen. Den erhöhten Störungsbewertungen und größeren maximalen Lenkradwinkeln stehen sehr schnelle, lenkungsbezogene Reaktionszeiten und starke Bremsreaktionen gegenüber.
- Zwischen den übrigen Szenarien lassen sich für keinen der Systemzustände Unterschiede feststellen. Ebenso treten innerhalb der Fahrszenarien keine stärkeren Bremsreaktionen für Systemeingriffe auf.
- Nach den bisherigen Analysen zeigen sich für beide systembasierten Ereignisse der Geradeausfahrt sehr moderate Kennwerte des Verhaltens und Erlebens.

- Die Einfahrt in eine Baustelle kann unter inhaltlichen Gesichtspunkten für systembasierte Eingriffe und Übergaben als beherrschbar angesehen werden. Aus methodischer Sicht zeigen sich insbesondere für die Übernahmeszenarien zunächst unerwartete Effekte. Kompensatorische Verhaltensweisen treten trotz höherer Störungsbewertungen nicht in dem erwarteten Umfang auf.

4.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zu Systemstatus und Fahrszenarios

Systembasierte Ereignisse innerhalb des Kurvenszenarios gehen mit den höchsten Störungsbewertungen einher und wirken störender auf den Fahrer als Ereignisse in den übrigen Szenarien. Auf Seiten des Verhaltens können zudem erhöhte maximale Lenkradwinkel festgestellt werden, die mit Systemeingriffen nochmals vergrößert sind. Die maximalen Auslenkungen, die nach Systemübergaben zugelassen werden, sind ebenfalls erhöht, setzen sich gegenüber dem Baustellenszenario jedoch nicht ab. Den generell erhöhten Auslenkungen des Kurvenszenarios stehen sehr geringe lenkungsbezogene Reaktionszeiten gegenüber, die auf eine sehr schnelle Begrenzung der Eingriffe hinweisen. Außerdem wird sowohl auf Systemübergaben als auch auf Eingriffe mit starkem Bremsverhalten reagiert. Insgesamt kann daher von einer guten Beherrschbarkeit der systembasierten Ereignisse innerhalb des Kurvenszenarios ausgegangen werden.

Im Vergleich zu den deutlichen Auswirkungen des Kurvenszenarios zeigen sich innerhalb der Geradeausfahrt sehr geringe Effekte. Niedrige Störungsbewertungen für beide systembasierten Ereignisse gehen mit geringen maximalen Lenkradwinkeln und schnellen Begrenzungen einher. Die relativ geringe Bremsintensität, mit der Fahrer reagieren, kann in diesem Zusammenhang als weniger bedeutend eingestuft werden. Offenbar bewerteten die Probanden stärkere Bremsreaktionen als nicht notwendig, um die Eingriffe und Übergabeszenarien erfolgreich zu bewältigen.

Die Bewertung des Baustellenszenarios muss hingegen differenzierter ausfallen. Die subjektiv wahrgenommene Störung der systembasierten Eingriffe kann nicht von denen der Kurve differenziert werden. Obwohl der Bereich der „Störung des Fahrens“ nicht verlassen wird, liegen die mittleren Bewertungen dieser Fahrsituation an der Grenze zur subjektiv empfundenen „Gefährlichkeit“. Die maximalen Lenkradwinkel dieses Szenarios liegen im Vergleich zu den übrigen Szenarien in einem mittleren Niveau, ohne dass sich nach Systemübergaben Unterschiede zu den erhöhten Auslenkungen des Kurvenszenarios finden lassen. Obwohl die zugelassenen Auslenkungen infolge der Systemübergaben deutlich kleiner als nach Systemeingriffen ausfallen, weisen die lenkungsbezogenen Reaktionszeiten auf einen unerwünschten Befund hin. Die Auslenkungen infolge der Systemübergaben werden deutlich später begrenzt als die übrigen systembedingten Ereignisse. Zudem liegt innerhalb des Baustellenszenarios eine relativ geringe Bremsintensität vor, die sich nicht von den Bremsreaktionen innerhalb der Geradeausfahrt unterscheiden lässt.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass sich das hier gewählte Baustellenszenario besonders für die Bewertung von Übernahmesituationen eignet. Die verschiedenen Befunde zur Wahrnehmung und zum Verhalten der Probanden in dieser Versuchsbedingung weisen darauf hin, dass zwar stärkere kompensatorische Handlungen möglich wären, diese aber nicht vollends ausgeführt werden. Unter

inhaltlichen Gesichtspunkten der Beherrschbarkeit muss diese Versuchsbedingung dennoch nicht als kritisch bewertet werden. Obwohl der relative Vergleich der lenkungsbezogenen Reaktionszeiten langsamere Reaktionen in Baustellenszenarien zeigt, weisen die absoluten Werte immer noch auf eine schnelle Fahrerreaktion nach ca. 850 ms hin. Da die plötzlichen Deaktivierungen des Systems das Einsetzen der Motorbremse beinhaltete, stellt die relativ geringe Bremsintensität keine fehlerhafte Verhaltensweise dar. Zusammenfassend kann somit davon ausgegangen werden, dass zwar bessere kompensatorische Handlungen möglich sind, die Übernahmeaufforderungen innerhalb des Baustellenszenarios jedoch ausreichend beherrscht werden.

4.4 Ergebnisse zu den Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsrichtung

Um die Auswirkungen der Eingriffsrichtung und verschiedener Eingriffskombinationen zu untersuchen, wurde den Versuchspersonen eine weitere Kombination von Quer- und Längseingriffen dargeboten. Dieses zweite Eingriffsbild bestand aus einem Lenkeingriff nach rechts mit einem gleichzeitigen Bremsingriff und wurde in dieser Form nur während der Ausfahrt aus dem Baustellenszenario aufgeschaltet. Durch die Spurführung dieses Versuchsabschnitts und das dargebotene Eingriffsbild wurde eine komplementäre Situation zur Baustelleneinfahrt hergestellt (vgl. Abbildung 11). Die Eingriffe erfolgten in beiden Szenarien mit gleicher Intensität. Unterschiede in den Störungsbewertungen und in den Reaktionen der Fahrer sollen damit auf die Richtungen der Eingriffskombination zurückgeführt werden. Zwar unterscheiden sich die Anforderungen der Szenarien durch die auszuführenden Lenkbewegungen (Baustelleneinfahrt: Lenkbewegung nach rechts, Baustellenausfahrt: Lenkbewegung nach links), die Richtung der dargebotenen Eingriffskombinationen nivelliert diesen Unterschied jedoch. Da sich die Querkomponenten der Eingriffsbilder relativ zu den Bedingungen der Fahrbahn verhalten, können Unterschiede zwischen diesen beiden Versuchsbedingungen durch die Längskomponenten der Eingriffskombination erklärt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Szenarien, einschließlich der Übernahme-situationen, gegenübergestellt. Da in der Art der Systemübergaben keine Unterschiede bestanden, werden die Effekte auf das Fahrszenario zurückgeführt. Die Berechnungen erfolgten analog zum obigen Vorgehen anhand einer multivariaten Varianzanalyse mit Messwiederholungen.

Die statistische Analyse der subjektiven und objektiven Daten zeigt deutliche globale Effekte für beide Faktoren, einschließlich deren Interaktion (siehe Tabelle 11). Alle Effekte der abhängigen Variablen können interpretiert werden.

Tabelle 11: Ergebnisse der multivariaten Tests (Inner- und Zwischensubjekttests) für die Faktoren „Fahrszenario“ und „Systemstatus“ der Baustellenein- und -ausfahrt. Auf globaler Ebene werden beide Faktoren, einschließlich der Wechselwirkung, wirksam.

	Hypothese df	F	Fehler df	Sig.
Fahrszenario	8	21.93	49	<.001
Systemstatus	8	59.40	49	<.001
Fahrszenario * Systemstatus	8	16.41	49	<.001

Subjektive Störungsbewertungen

Für die subjektiven Störungsbewertungen zeigen sich signifikante Haupteffekte beider Faktoren. Eine Interaktion beider Größen kann nicht festgestellt werden (siehe Tabelle 12). Plötzliche Eingriffe in die Fahrzeugführung wirken auch in diesem Vergleich störender als der unmittelbare Wegfall der teilautomatisierten Unterstützung (Systemübergaben, siehe Abbildung 17). Zudem übersteigen die Bewertungen der Baustelleneinfahrt deutlich die wahrgenommene Störung in der Ausfahrt.

Tabelle 12: Ergebnisse der univariaten Tests und der Tests der Zwischensubjekteffekte für die subjektiven Störungsbewertungen.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrscenario	1.00	9.24	56	.004
Systemstatus	1.00	21.53	56	<.001
Fahrscenario * Systemstatus	1.00	.10	56	.752

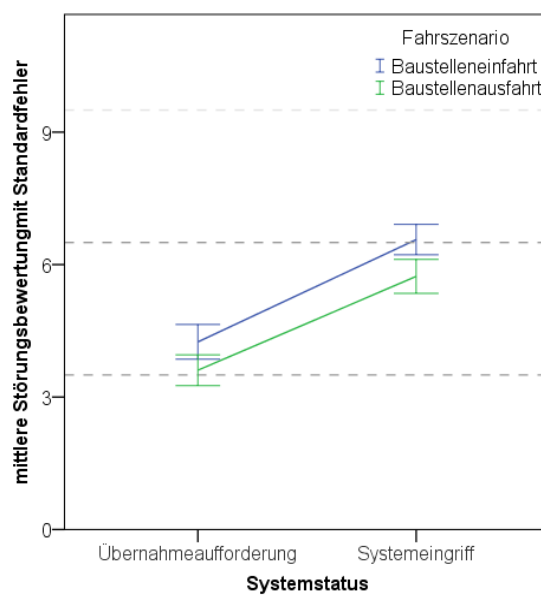


Abbildung 17: Darstellung der Störungsbewertungen für die simulierte Baustellenein- und -ausfahrt in Abhängigkeit des Systemstatus.

Das in der Baustelleneinfahrt aufgeschaltete Eingriffsbild wird im Mittel als „störend“ bewertet und liegt mit einer mittleren Bewertung von 6.51 (vgl. Abbildung 17) an der oberen Grenze dieser Kategorie. Werden anstatt der positiven Beschleunigungen Bremsmanöver als longitudinale Komponenten verwendet, verringert sich die wahrgenommene Störung signifikant ($p_{Ee-Ae} = .018$). Da die Systemeingriffe innerhalb der Baustellenausfahrt jedoch nur geringfügig unter denen der -einfahrt liegen, kann nicht von einer stark nivellierenden Wirkung ausgegangen werden. Auch hier liegen die mittleren Bewertungen im oberen Bereich der Kategorie „Störung des Fahrens“ ($M_{Ae} = 5.72$, $SD = 2.09$). Abgesehen von den eher geringen Unterschieden, die in Abhängigkeit der longitudinalen Komponente auftreten, spricht ein weiterer Befund gegen deutliche Auswirkung des Bremseingriffs. Für die Übernahme-szenarien lässt sich das identische Verhältnis der mittleren Bewertungen für beide Fahrscenarien feststellen ($p_{Eü-Aü} < .001$). Die Übernahme-szenarien werden zwar in beiden Fällen weniger störend als die Fehlerbilder bewertet ($M_{Eü} = 4.25$, $SD = 2.11$; $M_{Aü} = 3.60$, $SD = 1.87$); die Differenz zwischen beiden mittleren Bewertungen (Baustellenein- und -ausfahrt) bleibt jedoch für beide Systemzustände weitgehend konstant ($M_{\Delta ü} = 0.65$, $M_{\Delta e} = 0.83$). Da sich die Eigenschaften der Übernahmeaufforderungen in beiden Szenarien nicht

unterschieden, müssen die Unterschiede auf das Fahrerszenario zurückgeführt werden. Geht man davon aus, dass die geringeren Störungsbewertungen innerhalb der Baustellenausfahrt auch für die Versuchsbedingungen der Systemeingriffe zugrunde gelegt werden können, wird ein deutlicher Einfluss des Bremseneingriffs unwahrscheinlich. Die geringeren Störungsbewertungen der Eingriffskombination aus dem Ausfahrtszenario können damit nicht durch die Verzögerung des Fahrzeugs erklärt werden. Aus welchem Grund das Szenario der Baustellenausfahrt als weniger störend bewertet wird, kann nicht geklärt werden.

Die Ergebnisse zur subjektiven Wahrnehmung der Fehlerbilder können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Systemeingriffe wirken störender als Übernahmeaufforderungen.
- Systemeingriffe mit Verzögerungen als longitudinale Komponente (Baustellenausfahrt) werden im Vergleich zu Kombinationen mit Beschleunigungskomponente geringfügig positiver bewertet. Da die Bewertungen des Ausfahrtszenarios jedoch auch mit Übernahmeaufforderungen positiver ausfallen, ist eine begünstigende Auswirkung der Bremsmanöver innerhalb dieses Settings unwahrscheinlich.

Maximaler Lenkradwinkel

Die Analyse der maximalen Lenkradwinkel zeigt ebenfalls signifikante Haupteffekte beider Faktoren (siehe Tabelle 13). Systemeingriffe gehen insgesamt mit größeren maximalen Lenkradwinkeln als Übernahmeszenarien einher. Da im Falle von Systemeingriffen aktiv in die Querführung eingegriffen wurde, entsprechen diese Ergebnisse den Erwartungen und decken sich mit den Störungsbewertungen.

Tabelle 13: Ergebnisse der univariaten Tests und der Tests der Zwischensubjekteffekte für den maximalen Lenkradwinkel. Fahrerszenario und Systemstatus wirken unabhängig auf die zugelassene Auslenkung.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrerszenario	1.00	8.15	56	.006
Systemstatus	1.00	63.42	56	<.001
Fahrerszenario * Systemstatus	1.00	.067	56	.796

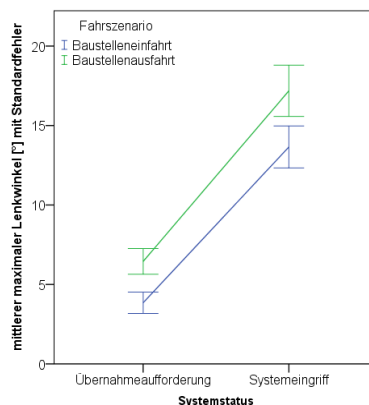


Abbildung 18: Darstellung der mittleren maximalen Lenkradwinkel der beiden Versuchsgruppen getrennt nach Fahrerszenarien.

In Bezug auf die Auswirkungen der Fahrerszenarien zeigen sich jedoch Unterschiede zur subjektiven Wahrnehmung. Die als weniger störend bewertete Baustellenausfahrt weist höhere maximale

Lenkradwinkel als das Einfahrt-Szenario auf (Abbildung 18). Für die Einzelvergleiche der Auswirkungen in Abhängigkeit des Systemstatus zeigen sich damit zwei Besonderheiten. Zum einen zeigen sich für identische Übernahmeszenarien unterschiedliche Lenkreaktionen innerhalb der Baustellenein- und -ausfahrt. Für Übernahmeszenarien innerhalb einer Baustellenausfahrt muss von einer geringfügig verschlechterten Begrenzung der Auslenkung ausgegangen werden ($M_{Aü} = 6.45^\circ$, $SD = 4.33$, $p_{Aü-Eü} = .011$). Dieses Verhältnis spiegelt sich nicht in den Störungsbewertungen wider und widerspricht den Erwartungen. Zum anderen können anhand der unterschiedlichen Lenkreaktionen bei Systemeingriffen Effekte der longitudinalen Komponenten in Erwägung gezogen werden. Bei identischen Lenkeingriffen treten mit positiven Beschleunigungen (Baustelleinfahrt, $M_{Ee} = 14.13$, $SD = 6.87$) geringere Auslenkungen als mit Verzögerungen (Baustellenausfahrt, $M_{Ee} = 17.24^\circ$, $SD = 8.98$) auf. Die als störend erlebten Eingriffe der Einfahrt werden in Bezug auf die zugelassene Auslenkung besser kontrolliert als die weniger störenden Eingriffe der Ausfahrt. Dieses Datenmuster kann im Sinne einer erhöhten Toleranz gedeutet werden, sofern mit Lenkeingriffen Bremsmanöver aufgeschaltet werden. Da die Versuchsbedingungen bzw. die Fahrszenarien jedoch an sich unterschiedliche Auswirkungen hervorrufen (siehe oben), kann dieser Interpretation nur eingeschränkt gefolgt werden.

Die Ergebnisse werden in folgenden Punkten zusammengefasst:

- Systemeingriffe gehen mit größeren maximalen Lenkradwinkeln einher als Übernahmeszenarien.
- Die als weniger störend bewertete Baustellenausfahrt weist im Vergleich zur -einfahrt größere maximale Lenkradwinkel auf. Systembasierte Ereignisse werden innerhalb des hier umgesetzten Ausfahrt-Szenarios schlechter kontrolliert.
- Obwohl Systemübergaben in beiden Szenarien identisch verliefen, kann für die Baustellenausfahrt von einer geringfügig verschlechterten Begrenzung der Lenkradrückstellung ausgegangen werden.
- Anhand des maximalen Lenkradwinkels, einem primär lateralen Verhaltensmaß, können Auswirkungen der longitudinalen Komponente festgestellt werden. Liegen Verzögerungen innerhalb der kombinierten Eingriffe vor, treten geringfügig erhöhte maximale Lenkradwinkel auf. Dieses Datenmuster kann auf eine erhöhte Toleranz im Falle von gleichzeitigen Bremsmanövern hindeuten bzw. für kompensatorische Fahrerreaktion sprechen.
- Da die Versuchsbedingungen offenbar keine identischen Voraussetzungen schaffen (identische systembasierte Ereignisse führen zu unterschiedlichem Erleben und Verhalten), können die Auswirkungen der Fehlerbilder auf das Lenkverhalten nur eingeschränkt interpretiert werden. Die Kontrolle der Sekundär- bzw. die Minimierung der Fehlervarianz ist innerhalb dieses Teilversuches demnach nicht ausreichend gelungen.

Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels

Die lenkradbezogene Reaktionszeit wird ausschließlich durch den Systemstatus beeinflusst (siehe Tabelle 14). Unterschiede in den Reaktionszeiten treten demnach nur zwischen Übernahme-situationen und Systemeingriffen auf. Die Art der Systemeingriffe bzw. die Richtung der lateralen Eingriffskomponente ist unerheblich für den Zeitpunkt der Begrenzung.

Tabelle 14: Ergebnisse der univariaten Tests und der Tests der Zwischensubjekteffekte für den Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels. Nur der Systemstatus zeigt Auswirkung auf die lenkradbezogene Reaktionszeit. Unterschiede zwischen den beiden Baustellenszenarien liegen nicht vor.

	df	F	Fehler df	Sig.
Fahrerszenario	1.00	1.94	56	.169
Systemstatus	1.00	169.36	56	<.001
Fahrerszenario * Systemstatus	1.00	.01	56	.927

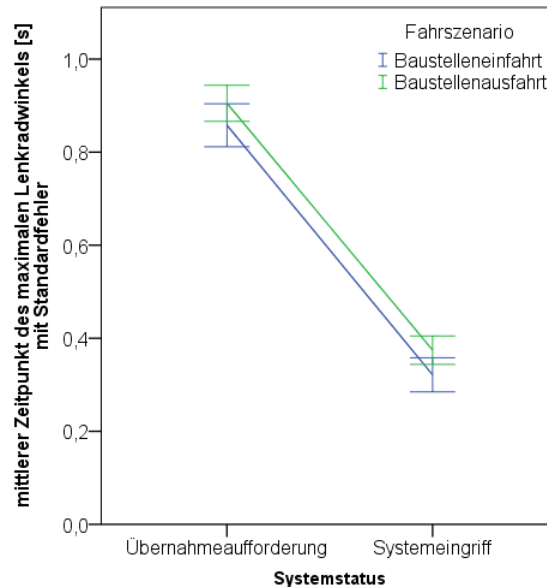


Abbildung 19: Darstellung der Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels in Abhängigkeit des Systemstatus und der Fahrerszenarien bzw. Eingriffsbilder.

Die Übernahme-szenarien gehen im Mittel mit Reaktionszeiten von 880 ms ($M_{\bar{u}} = 0.881s$, $SD = 0.23$) einher und liegen damit im Bereich der in Kapitel 4.3 diskutierten Werte. Damit treten die erhöhten Reaktionszeiten erneut im Kontext der Baustelle auf und sind nicht nur im Bereich der Baustelleneinfahrt erhöht. Die lenkungsbezogenen Reaktionszeiten infolge der Eingriffsbilder sind demgegenüber deutlich verringert und weisen im Mittel auf Fahrerreaktionen nach 350 ms hin ($M_e = 0.348s$, $SD = 0.18$). Da in der Folge der beiden Eingriffsbilder keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zeitpunkten auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass die erhöhten Lenkradwinkel der Baustellenausfahrt nicht später kontrolliert werden. Die geringfügig erhöhten Auslenkungen nach Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponente führen nicht zu längeren Reaktionszeiten, sondern werden zu vergleichbaren Zeitpunkten kontrolliert. Auswirkungen des Fahrerszenarios, wie sie nach der Analyse der Störungsbewertungen angenommen werden müssen, zeigen sich hier nicht.

- Die lenkungsbezogenen Reaktionszeiten werden ausschließlich durch den Systemstatus beeinflusst. Unterschiede zwischen den Fahrerszenarien treten weder für die Übernahmeaufforderungen noch für die beiden Eingriffsbilder auf.
- Die erhöhten Reaktionszeiten bei Systemübergaben innerhalb einer Baustelleneinfahrt treten auch während der Ausfahrt aus der Baustelle auf und sind somit für beide Übernahme-szenarien erhöht.

- Die Auslenkungen infolge störender Systemeingriffe werden schneller begrenzt als die weniger störenden Übernahme Szenarien.
- Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponenten gehen mit geringfügig erhöhten maximalen Lenkradwinkeln einher, die jedoch zu vergleichbaren Zeitpunkten kontrolliert werden.

4.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zur longitudinalen Eingriffsrichtung

Die Vergleiche beider systembasierten Ereignisse (Übernahmeaufforderungen und kombinierte Eingriffe in die Quer- und Längsführung) zeigen zunächst das bekannte Muster. Systemeingriffe wirken störender als Übernahmeaufforderungen und gehen mit leicht erhöhten maximalen Auslenkungen einher. Ebenso werden diese Auslenkungen schneller begrenzt als die weniger störenden Übernahmeaufforderungen. Des Weiteren kann ein zunächst nachvollziehbarer Trend festgestellt werden, indem Eingriffe mit Verzögerungskomponenten etwas weniger störend wirken. Bremsmanöver scheinen entschärfend auf die Situation zu wirken. Dieses Ergebnis kann jedoch nicht ohne Einschränkung verallgemeinert werden.

Der Vergleich der Fahrerreaktionen in Folge der Übernahme Szenarien zeigt leicht abweichende Ergebnisse in beiden Szenarien: Übernahmeaufforderungen innerhalb der Baustellenausfahrt werden etwas positiver bewertet. Da es sich bei beiden Übernahmeaufforderungen jedoch um weitgehend identische Systemreaktionen handelt (die Deaktivierungen des Systems fanden innerhalb der Baustellenein- und -ausfahrt in vergleichbarer Weise statt), muss davon ausgegangen werden, dass beide Szenarien unterschiedliche Anforderungen an die Probanden stellten. Demnach können die unterschiedlichen Verhaltensweisen nicht eindeutig auf die longitudinale Eingriffsrichtung zurückgeführt werden. Effekte des Fahr Szenarios sind, zumindest in Teilen, ebenso wahrscheinlich.

Vor diesem Hintergrund scheint auch die Interpretation des Lenkverhaltens erschwert. Zwar können mit Verzögerungen etwas größere Auslenkungen festgestellt werden, auf die im Vergleich zu Beschleunigungen in ähnlicher Weise schnell reagiert wird. Ob dieses Verhaltensmuster jedoch auf die Richtung der Längsbeschleunigung oder aber auf das Fahr Szenario zurückgeführt werden kann, muss zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch offen bleiben.

4.5 Bewertung der Ergebnisse

4.5.1 Fazit zur Beherrschbarkeit von Übernahme Situationen

Probanden, die mit Systemgrenzen konfrontiert wurden, mussten nach der Ausgabe von Übernahmeaufforderungen zuvor automatisch ausgeführte Fahraufgaben manuell ausführen. Die zuvor aktivierte Quer- und Längsführung steuerte die Geschwindigkeit, den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen und die Spurhaltung. Die Deaktivierung des Assistenzsystems ging für die Querführung mit dem Verlust jeglicher Zusatzlenkmomente und dem Aufkommen der üblichen Rückstellkraft einher. Im Bereich der Längsführung führte die Deaktivierung zu einem Einsetzen der Motorbremse. Der Zeitpunkt und Ort der Deaktivierung war für die Teilnehmer der Studie nicht vorauszusehen.

Die subjektiven Bewertungen der Übernahme Szenarien gehen nicht über den „störenden“ Bereich der Störungsbewertungsskala hinaus. Keine der umgesetzten Versuchsbedingungen wird im Mittel von den

Probanden als kritisch wahrgenommen. Die geringen Auslenkungen, die Fahrer in der geringfügig höher bewerteten Baustelleneinfahrt zulassen, untermauern diesen Befund. Es können keine statistisch relevanten Unterschiede zur einfachen Geradeausfahrt festgestellt werden, in der die Deaktivierung der assistierten Querführung weitgehend folgenlos bleibt. Auslenkungen innerhalb des Kurvenszenarios sind dieser Versuchsbedingung gegenüber leicht erhöht, ohne dass sich hier wiederum Unterschiede zur Einfahrt in eine Baustelle feststellen lassen. Die lenkradbezogenen Reaktionen erfolgen, abgesehen von dem Szenario der Baustelleneinfahrt, sehr schnell. Die größten Auslenkungen innerhalb der Geradeausfahrt und des Kurvenszenarios treten schon nach ca. 40 Millisekunden auf und sprechen für sehr gute Fahrerreaktion bei unerwarteten Übernahmeaufforderungen durch die teilautomatisierte Fahrfunktion. Die Reaktionen auf Systemübergaben innerhalb des Baustellenszenarios sind im Vergleich hierzu deutlich erhöht und liegen zwischen 80 und 90 Millisekunden. Da die eigentlichen Auslenkungen nicht besonders groß sind, müssen die verlangsamten Reaktionen nicht als kritisch eingestuft werden, weisen aber auf die Relevanz des Fahrszenarios für die Bewertung von Übernahmeszenarios hin. Die Bremsintensitäten fügen sich in das Gesamtbild und sind nur dort bedeutsam erhöht, wo eine Bremsreaktion tatsächlich nötig ist. Der maximale Bremspedalweg nach der Übernahmeaufforderung in der Kurve setzte sich somit deutlich ab.

Die für die Übernahmesituationen gefundenen Verhaltensmuster entsprechen damit weitgehend den Wahrnehmungen der Versuchsteilnehmer. Alle dargebotenen Szenarien werden gut beherrscht und deuten nicht auf Probleme in der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion hin. Insgesamt scheinen Fahrer auf plötzlich ausbleibende Unterstützung durch teilautomatisierte Fahrfunktionen gut reagieren zu können. Obwohl diese Verhaltens- und Erlebensmuster des Kurvenszenarios zunächst auffällig wirken, scheint die hier umgesetzte Einfahrt in eine Baustelle aussagekräftigere Befunde zu liefern. Insgesamt muss natürlich beachtet werden, dass die Fahrer sich bewusst waren, an einer Untersuchung teilzunehmen, was gegenüber Alltagsfahrten eine höhere Aufmerksamkeit erwarten lässt. Insofern ist die Übertragbarkeit gegenüber diesen Situationen möglicherweise eingeschränkt.

4.5.2 Fazit zur Beherrschbarkeit von Systemeingriffen

Teilnehmer der Versuchsgruppe mit Systemeingriffen wurden Eingriffen ausgesetzt, die aus einer Kombination von Quer- und Längsmanipulation bestanden. Für die Fahrszenarien „Geradeausfahrt“, „Baustelleneinfahrt“ und „Kurve“ bestanden diese Eingriffe aus einer positiven Beschleunigung mit einem Lenkeingriff nach links. Der Lenkeingriff wurde als sprunghaft ansteigendes Lenkmoment (rechteckiges Signal) mit einer Dauer von zwei Sekunden umgesetzt. Für das Fahrszenario der „Baustellenausfahrt“ wurde ein komplementäres Muster mit umgekehrten Eingriffsrichtungen, jedoch identischen Eingriffsstärken dargeboten. Diese Versuchsbedingung zielt auf Effekte der Längskomponente ab und wird im Anschluss diskutiert. Zeitpunkt und Ort der Eingriffe waren für die Versuchsteilnehmer nicht vorherzusehen. Die Ereignisse wurden bei aktivierter Funktion ausgelöst und überlagerten die korrekte Quer- und Längsführung des Systems.

Die Darbietung von komplexeren Eingriffskombinationen geht mit deutlichen Auswirkungen auf die subjektive Wahrnehmung der Probanden einher. Für die drei Fahrszenarien sind dabei starke Unterschiede zu erkennen. Unerwartete Eingriffe in der Baustelleneinfahrt und der Kurvensituation

werden von den Teilnehmern als „gefährlich“ bewertet und stellen hinsichtlich der Störungsbewertung eine homogene Gruppe dar. Anhand der maximal zugelassenen Lenkradwinkel lassen sich die Unterschiede ebenfalls nachvollziehen, die Reaktionen der beiden Szenarien setzen sich hier von einer einfachen Geradeausfahrt ab. Vor dem Hintergrund der lenkradbezogenen Reaktionszeiten entschärft sich die Beurteilung der Situationen. Die festgestellten erhöhten maximalen Lenkradwinkel werden alle zu vergleichbaren Zeitpunkten und eben so früh wie die Auslenkungen der Geradeausfahrt kontrolliert. Mit ca. 320 Millisekunden treten diese Reaktionen zudem sehr schnell auf, sodass hier von sehr guten Fahrerreaktionen ausgegangen werden kann. Auf die besonders störenden Systemeingriffe innerhalb des Kurvenszenarios wird zudem mit starken Bremsreaktionen reagiert, die auf eine angebrachte Fahrerreaktion schließen lassen.

Als sensitive Szenarien für die Bewertung von unerwarteter Eingriffskombination können so die Einfahrt in eine Baustelle und das Kurvenszenario identifiziert werden. Da insbesondere für das Kurvenszenario hohe Störungsbewertungen vorliegen, kann von stärkeren Anforderungen an den Fahrer ausgegangen werden. Demgegenüber stehen sehr gute Fahrerreaktionen, die ebenfalls am deutlichsten für das Kurvenszenario festgestellt werden können. Die Einfahrt in eine Autobahnbaustelle liegt auf vergleichbarem Niveau der Störungsbewertung, zeichnet sich aber durch schwächere Auswirkungen auf das Fahrerverhalten aus. Hier wären stärkere Bremsreaktionen zu erwarten gewesen. Insgesamt handelt es sich um sensitive Prüfzuszenarien, in denen eine gute Kontrollierbarkeit der Assistenzereignisse festgestellt werden kann. Einschränkung muss hierbei erwähnt werden, dass diese Beurteilung nur aufgrund der Verhaltensdaten vorgenommen werden kann. Eine ausschließliche Betrachtung der subjektiven Störungsbewertungen innerhalb der Kurvensituation hätte diese Aussage aufgrund der hohen mittleren Bewertungen nicht zugelassen. Diese Aussagen können zunächst für Eingriffskombinationen getroffen werden, die bei aktiviertem Assistenzsystem auftreten und die optimale Quer- und Längsführung überlagern. In Kapitel 5 werden die Auswirkungen von Eingriffskombinationen beleuchtet, die ohne aktivierte Fahrerassistenz auftreten.

4.5.3 Beherrschbarkeit von Übernahmesituationen und Systemeingriffen im Vergleich

Im Falle aktivierter Quer- und Längsführungsassistenz gehen überlagernde Eingriffe mit deutlich stärkeren Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einher als bei den dargebotenen Übernahmeszenarien. Dies ist auch dann der Fall, wenn die plötzlichen Deaktivierungen der Assistenzfunktion mit einer sprunghaften Rücknahme der Lenkunterstützung kombiniert werden (Kurvenszenario) und damit einem Eingriff in die Lenkung sehr nahe kommen. Hier zeichnet sich bereits die Bedeutung der Längskomponente von kombinierten Eingriffen ab, die zunächst in Kapitel 4.4 und anschließend detaillierter in Kapitel 5 untersucht wird. Die Muster der Auswirkungen beider Systemzustände gleichen sich für die verschiedenen Fahrszenarien weitgehend für alle betrachteten Maße. In nahezu allen Fällen wiegen die Auswirkungen nach Systemeingriffen schwerwiegender, wenngleich für beide Systemzustände eine gute Beherrschbarkeit festgestellt werden kann.

4.5.4 Fazit zu den Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsrichtung

Die Ergebnisse der Simulatorstudie lassen keine eindeutigen Schlüsse auf die Rolle der longitudinalen Komponente von kombinierten Eingriffen während der aktivierten Teilautomation zu. Zwar deuten die

Störungsbewertungen im direkten Vergleich der Kombinationen auf stärkere Auswirkungen von Beschleunigungen hin, ohne dass jedoch der Einfluss weiterer Effekte ausgeschlossen werden kann. Da identische Übernahmeaufforderungen (gleiches Systemverhalten und identische visuelle sowie akustische Rückmeldungen) an vergleichbaren Fahrzeugpositionen ebenfalls zu unterschiedlichen Bewertungen führen, muss davon ausgegangen werden, dass weitere Einflüsse die subjektive Bewertung beeinträchtigen. Da die Herstellung identischer Fahrscenarien damit nicht vollständig gelungen ist, müssen die übrigen Verhaltensmuster ebenfalls vor diesem Hintergrund beurteilt werden. Die Tatsache, dass mit der Kombination „Lenkeingriff und Verzögerung“ geringfügig größere Auslenkungen zugelassen wurden, kann somit nicht einwandfrei auf erhöhte Toleranzen bei Kombinationen mit Verzögerungskomponente zurückgeführt werden. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass die Sekundär- und Fehlervarianz nicht in ausreichendem Maße kontrolliert bzw. minimiert wurde. Dieser methodische Aspekt betrifft überraschender Weise nicht die lenkradbezogenen Reaktionszeiten. Hier treten keine Unterschiede zwischen den Eingriffsbildern bzw. Fahrscenarien auf, sodass von relativ schnellen Begrenzungen nach ca. 350 Millisekunden ausgegangen werden kann.

4.6 Einschränkungen und weiterer Analysebedarf

Die Interpretation der oben beschriebenen Befunde darf nicht ohne die Berücksichtigung verschiedener methodischer Aspekte erfolgen. Zum einen muss die wiederholte Darbietung der systembasierten Ereignisse diskutiert werden. Obwohl der Ort des Ereignisses nicht vorhergesehen werden konnte, muss davon ausgegangen werden, dass die Probanden nach dem erstmaligen Auftreten des gruppenspezifischen Ereignisses besser auf folgende Versuchsbedingung vorbereitet waren. Die wiederholte Darbietung kann damit, im Vergleich zur Erstkonfrontation, verbesserte Fahrerreaktionen bewirkt haben. Da die erste Reaktion auf die systembasierten Ereignisse aufgrund einer zu geringen Stichprobengröße nicht getrennt analysiert wurde, können keine Aussagen über mögliche Auswirkungen von Lerneffekten bzw. über die Rolle der Erwartungshaltungen getroffen werden. Für folgende Untersuchungen, die ebenfalls verschiedene systembasierte Ereignisse beleuchten, kann entweder eine nur einmalige Darbietung der Ereignisse oder die Darbietung unterschiedlicher Systemereignisse innerhalb einer Versuchsgruppe in Erwägung gezogen werden. Obwohl die letztere Variante die Probanden durch eine wiederholte Darbietung ebenfalls auf mögliche Ereignisse vorbereiten würde, wären unterschiedliche Reaktionen auf das Systemverhalten notwendig. Die Auswirkungen von Lerneffekten könnten so weiter minimiert werden. Darüber hinaus sind die hier getroffenen Aussagen mit den üblichen Einschränkungen eines feststehenden Fahrsimulators verbunden. Neben der simulierten Umgebung sind vor allem ausbleibende Beschleunigungskräfte zu nennen, die sich in den Bewertungen der Beherrschbarkeit als sehr relevant erwiesen haben (siehe Kapitel 2.6.3.3). Abgesehen von den bisher diskutierten Einschränkungen sind zudem begrenzt Aussagen durch den gewählten Untersuchungsansatz zu nennen. Obwohl ein grundsätzlicher Vergleich zwischen den Auswirkungen von Übernahmeszenarien und Fehlerbildern möglich ist, können keine Aussagen über unterschiedliche Ausprägungen der systembasierten Ereignisse getroffen werden. Da weder Eigenschaften der Übernahmeaufforderung variiert wurden (z. B. der zeitliche Abstand zur Systemdeaktivierung oder unterschiedliche Ausprägungen der optisch-akustischen Warnung), noch eine systematische Veränderung der Fehlerbilder vorgenommen wurde, können inhaltliche Zusammenhänge zwischen

verschiedenen Wirkgrößen nicht aufgedeckt werden. Die unter Gesichtspunkten der Beherrschbarkeit besonders relevanten Systemeingriffe wurden aus diesem Grund einer genaueren Analyse unterzogen und, wie im Folgenden geschildert, mit einem veränderten Untersuchungsansatz betrachtet.

5 Einflüsse von Intensität und Richtung bei kombinierten Eingriffen in die Fahrzeugführung

Um die Auswirkungen von Fehlerepisoden genauer zu untersuchen, wurde eine Realfahrtstudie mit kurzfristigen Eingriffen in die Längs- und Querführung durchgeführt. Der Fokus dieser Studie richtet sich auf die Rolle der Stärke und Richtung von kombinierten Eingriffen, die als wesentliche Einflussfaktoren der Beherrschbarkeit identifiziert wurden (vgl. Kapitel 2.6.3.1). Als Testfahrzeug wurde der Versuchsträger des Aktiv-IQF-Teilprojektes verwendet, der über alle erforderlichen Einbauten zur Evaluation einer integrierten Quer- und Längsführung verfügt. Im Folgenden werden zunächst das methodische Vorgehen und die Durchführung der Studie beschrieben. Daran anschließend werden die Ergebnisse für jedes Fahrszenario in einzelnen Kapiteln dargestellt.

5.1 Methodisches Vorgehen und Bewertungsansatz

Die Studienteilnehmer wurden in vier Fahrszenarien mit verschiedenen Eingriffskombinationen konfrontiert, die aus unterschiedlich starken Längs- und Querkomponenten bestanden. Um den Einfluss der Eingriffsrichtungen zu untersuchen, wurden die Eingriffe zudem in vier Richtungskombinationen jeweils einzelnen Versuchsgruppen dargeboten. Auf die hierbei erhobenen Verhaltens- und Wahrnehmungsmaße wird in Kapitel 5.1.3 eingegangen. Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Fehlerbilder und Prüfscenarien beschrieben.

5.1.1 Variation von Stärke und Richtung der Eingriffskombinationen

Den Teilnehmern der Studie wurden sechs Eingriffsbilder mit unterschiedlich starken Quer- und Längskomponenten dargeboten. Im direkten Anschluss an die Darbietung erfolgte eine subjektive Bewertung der Eingriffe. Abbildung 20 zeigt die verwendeten Amplitudenkombinationen der Eingriffsbilder. Die Stärke der lateralen Komponente wurde mit den Intensitäten „A“ und „B“ variiert ($A < B$). Als Signalform wurde eine sprungförmige (rechteckige) Aufschaltung gewählt, da dieses Charakteristikum eher dem „Worst-Case“ eines fehlerhaften Quereingriffs entspricht (Schmidt, 2009; Neukum et al., 2009, vgl. Kapitel 2.6.3.1). Die Rücknahme des lateralen Eingriffs erfolgte durch eine langsame Reduktion des Lenkmoments (rampenförmige Rücknahme). Als zweite Eingriffsdimension wurde die longitudinale Komponente variiert und mit den Beschleunigungswerten I und II dargeboten ($I < II$). Da die Untersuchung zudem einen Vergleich zwischen kompletten Kombinationen (gleichzeitige Quer- und Längseingriffe) und alleinigen Lenkungseingriffen ermöglichen sollte, wurde zudem die Längsintensität „0“ in das Darbietungsschema aufgenommen. Eingriffe dieser Art bestanden aus alleinigen Lenkungseingriffen ohne weitere Beeinflussung der Längsführung („eindimensionale Eingriffe“). Die Darbietung der sechs Eingriffsbilder („A0“, „B0“, „AI“, „BI“, „AII“ und „BII“) erfolgte in randomisierter Reihenfolge. Um neben den Auswirkungen der Intensität auch Einflüsse der Eingriffsrichtung zu untersuchen, wurden alle Eingriffsbilder für die vier möglichen Richtungskombinationen umgesetzt (positive Längsbeschleunigung mit Lenkeingriffen nach rechts, positive Längsbeschleunigung mit Lenkeingriffen nach links, Bremsen Eingriffe mit Lenkeingriffen nach rechts, Bremsen Eingriffe mit Lenkeingriffen nach links). Alleinige Lenkeingriffe wurden jeweils nach rechts und links ohne weitere Beeinflussung der Längsführung aufgeschaltet. Die Darbietung der Richtungskombinationen erfolgte in getrennten Versuchsgruppen (Between-Subject-Design) und wurde

innerhalb der Gruppen konstant gehalten. Für die insgesamt 20 Eingriffsbilder wurden Daten von 1646 Fehlerepisoden erhoben, die aufgrund des Versuchsdesigns aus intra- und individuellen Messreihen bestehen (siehe Anhang A für eine Darstellung der Häufigkeiten).

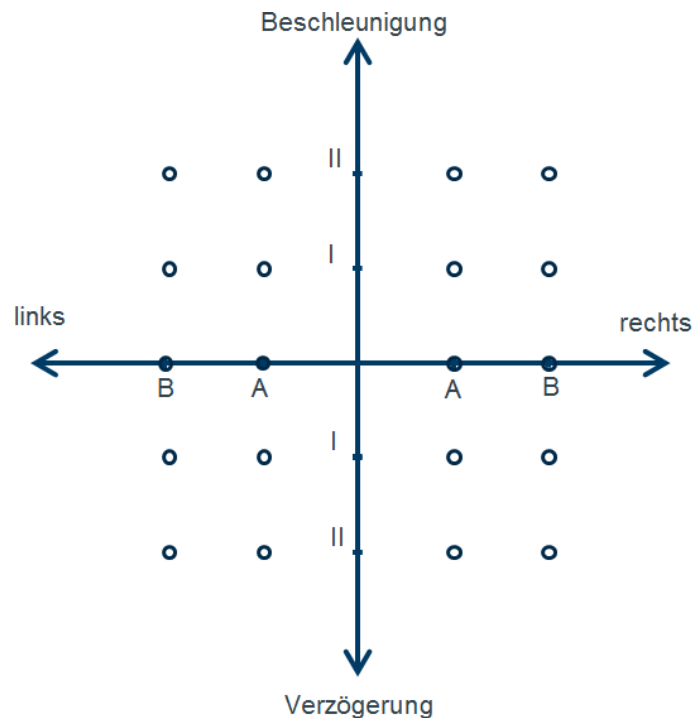


Abbildung 20: Schema der Eingriffsbilder für die Eingriffskombinationen und die alleinigen Lenkeingriffe. Die Buchstaben der Abszisse kennzeichnen die Intensität der Querkomponente ($A < B$). Die römischen Ziffern „I“ und „II“ der Ordinate kennzeichnen die Intensität der longitudinalen Komponente ($I < II$). Neben den kombinierten Quer- und Längseingriffen wurden alleinige Lenkeingriffe mit den Intensitäten „A“ und „B“ ohne weitere longitudinale Komponente dargeboten („A0“ und „B0“). Insgesamt wurden sechs verschiedene Paarungen von lateralen und longitudinalen Intensitäten umgesetzt. Die Aufschaltung dieser Eingriffsbilder erfolgte in allen vier Richtungskombinationen (positive Längsbeschleunigung mit Lenkeingriffen nach rechts, positive Längsbeschleunigung mit Lenkeingriffen nach links, Bremseneingriffe mit Lenkeingriffen nach rechts, Bremseneingriffe mit Lenkeingriffen nach links).

5.1.2 Fahrscenarien der Realfahrtstudie

Um die in Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse weiter zu differenzieren, wurden einzelne Szenarien der Simulatorstudie erneut aufgenommen. Darüber hinaus wurden die oben beschriebenen Fehlerbilder durch weitere Szenarien untersucht. Als Ausgangsszenario wurde erneut eine einfache Geradeausfahrt mit einer Spurbreite von 3,5 m realisiert (Abbildung 21a). Rechts neben dem Fahrstreifen verlief ein schmaler Streifen, der seinerseits durch Leitplanken nach rechts begrenzt war. Die linke Seite des Fahrstreifens war nur durch eine Linie gekennzeichnet, ohne dass weitere bauliche Maßnahmen das Befahren einer freien Asphaltfläche behinderten. Dieses Szenario stellt, wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben, ausschließliche Anforderungen an die Stabilisierungsfähigkeiten des Fahrers. Ausgehend von den oben dargestellten Ergebnissen werden hier die geringsten Effekte erwartet.

Da das Kurvenszenario sich in den vorangegangenen Studien als besonders sensitive Prüfsituation erwies, wurden die Auswirkungen von kombinierten Eingriffen in dieser Folgestudie ebenfalls in einer Kurvenfahrt untersucht. Der Kurvenradius betrug 200 m (Abbildung 21b) und war damit im Vergleich zur oben beschriebenen Simulatorstudie deutlich geringer. Die Eingriffsbilder wurden am Scheitelpunkt der

Kurve aufgeschaltet. Wenngleich dieses Szenario sich in bisherigen Untersuchungen als besonders sensitiv erwiesen hat, lassen sich diese Befunde weniger durch die damit verbundenen Handlungsanforderungen erklären. Für die Kurvenfahrt ist zwar davon auszugehen, dass die Anforderungen an den Fahrer denen einer einfachen Geradeausfahrt überlegen sind. Dies gilt insbesondere für die Ein- und Ausfahrt in einer Kurvensituation. Während der Durchfahrt besteht die Aufgabe des Fahrers lediglich im Aufrechterhalten der einmal hergestellten querdynamischen Ausgangslage. Eigentliche Anforderungen an die Führungsebene liegen bis zur Aufschaltung der Fehlerbilder nicht vor. Selbst nach der Aufschaltung sind eigentliche Anforderungen an die Führungsebene fraglich. Zwar kann die Übersteuerung kombinierter Eingriffe mit einer querdynamischen Ausgangslage erhöhte Anforderungen an den Fahrer stellen. Im Vergleich zu den Handlungsanforderungen des im Folgenden beschriebenen Fahrstreifenwechsels fallen diese jedoch vergleichsweise gering aus. Sollte sich hier erneut eine erhöhte Sensitivität des Kurvenszenarios zeigen, muss die Rolle der verhaltensbasierten Anforderungen für die Auswahl der Prüfscenarien hinterfragt werden.

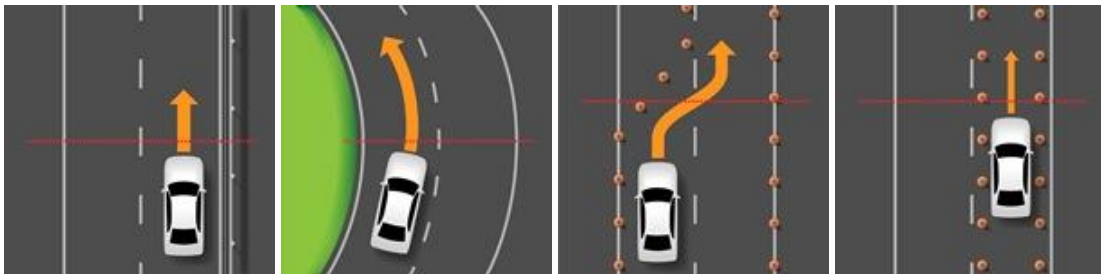


Abbildung 21: Prüfscenarien zur Bewertung der Intensität und Richtung von kombinierten Eingriffen in die Fahrzeugführung. Umgesetzt wurden die Szenarien Geradeausfahrt (Abbildung 21a), Kurvenfahrt (Abbildung 21b), Fahrstreifenwechsel (Abbildung 21c) und Engstelle (Abbildung 21d). Die rote Linie stellt den Auslösepunkt dar, an dem die jeweiligen Eingriffsbilder manuell aufgeschaltet wurden. Alle Szenarien wurden mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 80 km/h absolviert, die im Falle von Eingriffen in die Längskomponente manipuliert wurde.

Als ein weiteres, bereits bekanntes Szenario wurde das Einfahren in einen Pylonentrichter mit vorausgehendem Fahrstreifenwechsel realisiert (Abbildung 21c). Anders als das vergleichbare Simulatorszenario (Baustelleneinfahrt, vgl. Abbildung 11) mündete der Pylonentrichter nicht in einen verengten Fahrstreifen, erforderte aber zum Zeitpunkt der Eingriffe die gleichen Bediengaben für ein erfolgreiches Passieren. Der Auslösepunkt dieses Szenarios stellte die höchsten Anforderungen an die Versuchsleitung, da hier sowohl die laterale als auch die longitudinale Fahrzeugposition entscheidend für den Auslösezeitpunkt waren. Die Versuchsteilnehmer wurden in anfänglichen Übungsdurchgängen instruiert, den Lenkvorgang an einer bestimmten Stelle so einzuleiten, dass das Fahrzeug sich an einer weiteren definierten Position mit der Fahrzeugmitte über der Fahrstreifenmarkierung befand. Dieser Übergangspunkt lag ca. 5 m vor dem Pylonentrichter und stellte zugleich den Auslösepunkt dieses Szenarios dar. Die Eingriffsbilder wurden damit innerhalb des Lenkvorgangs (Lenkbewegung nach rechts) und vor dem Rückstellen des Lenkrads aufgeschaltet. Aufgrund der relativ dynamischen Anforderungen des Fahrscenarios wurde die Aufschaltung aus Sicht des Fahrers zu einem sehr ungünstigen Zeitpunkt vorgenommen. Zum einen wurde während eines aktiven Lenkvorgangs, in unmittelbarer Nähe zu den Pylonenbegrenzungen, in die laterale Fahrzeugführung eingegriffen. Wurden die Lenkeingriffe nach links ausgegeben, musste eine drohende Kollision mit den Pylonen der linken

Seite verhindert werden. Erfolgte die Ausgabe der Lenkmomente nach rechts, mussten die Fahrer die eigene Lenkbewegung so anpassen, dass kein zu starkes Ausweichen in Richtung der gegenüberliegenden Pylonen erfolgte. Die Beeinflussung der longitudinalen Komponenten bedingte zudem weitere kompensatorische Handlungen. Insbesondere Beschleunigungskomponenten erforderten entweder eine zusätzliche Bremsreaktion oder eine verbesserte Lenkreaktion, um einen erfolgreichen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen. Insgesamt stellt dieses Szenario damit die deutlichsten Anforderungen an die Führungsebene des Verhaltens, indem sowohl mit Quer- und Längseingriffen auf drohende Kollisionen mit Umweltobjekten reagiert werden musste. Die Fahrerreaktionen mussten zudem innerhalb eines aktuell ausgeführten Manövers umgesetzt werden und erforderten damit nochmals gesteigerte Leistungen.

Als neues Fahrscenario wurde eine Engstelle in die Realfahrtstudie aufgenommen (Abbildung 21d). Der durch eine Pylonengasse verengte Fahrstreifen (2,5 m) wurde auf eine Länge von 15 m begrenzt und auf gerader Strecke umgesetzt. Eine Engstelle hat sich für die Bewertung lateraler Eingriffe als besonders sensitive Situation erwiesen und stellt für die Beurteilung der Beherrschbarkeit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Mit der Darbietung von kombinierten Eingriffen sollten sich diese Ergebnisse bestätigen. Insbesondere die Darbietung von Eingriffen mit Beschleunigungskomponenten sollte erhöhte Störungsbewertungen liefern. Die Aufgabe des Fahrers besteht hierbei ebenfalls in der Stabilisierung des Fahrzeugs. Alle Szenarien wurden mit einer anfänglichen Geschwindigkeit von 80 km/h absolviert, die im Falle von Eingriffen in die Längsführung manipuliert wurden (vgl. Abbildung 20). Die Probanden wurden instruiert, die Eingriffe in die Quer- und Längsführung zu kompensieren und das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit in der Spur zu halten. Die Aufschaltung der Eingriffsbilder erfolgte manuell an definierten Auslösepunkten, die in den Abbildungen 21a - d durch eine rote Linie gekennzeichnet sind. Die vier Fahrscenarien wurden in einer festen Reihenfolge durchfahren (Geradeausfahrt, Kurve, Fahrstreifenwechsel, Engstelle), die über den gesamten Versuch nicht variierte wurde.

5.1.3 Maße der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Um die subjektiv wahrgenommene Beherrschbarkeit der Probanden zu messen, wurden die Subjektivurteile erneut mit der in Kapitel 2.6.2 beschriebenen Störungsbewertungsskala erhoben. Den Störungsbewertungen kommt eine Schlüsselrolle in der Bewertung von Assistenzeingriffen zu, da das subjektive Erleben von Fahrern als die wichtigste Größe in Fragen der Akzeptanz und der generellen Bewertung der Fahrzeugeigenschaften gelten kann. Tritt z. B. der Fall ein, dass systembasierte Manöver auf objektiver Ebene durchaus gut beherrschbar sind, von Fahrern jedoch als nicht mehr kontrollierbar erlebt werden, müssten die entsprechenden Systemauslegungen dennoch angepasst oder gänzlich abgelehnt werden. Für Bewertungen in niedrigen Skalenbereichen trifft diese Logik nicht mehr zu. In subjektiven Bereichen, die eher den Umfang der „Störung des Fahrens“, nicht aber eine mangelnde Beherrschbarkeit beschreiben, richtet sich das primäre Interesse auf das Zusammenspiel von subjektiven und objektiven Daten. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, inwieweit sich erhöhte Störungsbewertungen anhand objektiver Fahrzeugparameter nachvollziehen lassen und ob weitere Verhaltensmaße hiervon betroffen sind. Aus diesem Grund werden die Störungsbewertungen in den folgenden Darstellungen als Leitgröße betrachtet, denen im Falle von akzeptablen, aber störenden Bewertungen verhaltensbezogene Maße entgegengestellt werden.

Das Lenkverhalten infolge der Fehlerepisoden kann als ein weiteres zentrales Maß der Beherrschbarkeitsbewertung betrachtet werden. Auch in dieser Studie wird das erste Maximum des Lenkradwinkels nach der Aufschaltung der Fehlerbilder als die größte vom Fahrer zugelassene Auslenkung analysiert (vgl. Kapitel 4.2.3). Aufgrund der unterschiedlichen Eingriffsrichtungen erfolgt die Berechnung anhand des Betrags, der Beobachtungszeitraum umfasst die ersten beiden Sekunden nach der Aufschaltung. Der zugehörige Zeitpunkt, zu dem das erste Maximum des Lenkradwinkels auftritt, wird als lenkungsbezogene Reaktionszeit interpretiert und kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem der Quereingriff durch den Fahrer begrenzt wird.

Neben den direkten Verhaltensmaßen werden zudem resultierende Fahrzeugreaktionen zur Bewertung der Beherrschbarkeit herangezogen. Das übergeordnete Ziel dieser Analyse ist die Aufdeckung fahrzeugunabhängiger Einflussgrößen, die eine genaue Rückführung der subjektiven Kontrollierbarkeit auf das Fahrzeugverhalten erlauben (vgl. Kapitel 2.6.3.3). Die Spannweite der Gierrate errechnet sich aus dem Betrag der Differenz von minimaler und maximaler Gierrate innerhalb von zwei Sekunden nach den Lenkeingriffen. Um auch für Einflüsse der longitudinalen Komponenten vergleichbare Aussagen treffen zu können, wird zudem die Spannweite der Längsbeschleunigung betrachtet. Auch dieser Kennwert der resultierenden Fahrzeugreaktion gibt Auskunft über die Veränderungen, denen die Längsbeschleunigung unterliegt. Die Berechnung der Spannweite wird analog zu den Berechnungen der Gierrate aus dem Betrag der Differenz von maximaler und minimaler Längsbeschleunigung vorgenommen. Die Extrema beider Fahrzeugreaktionen wurden innerhalb eines Zeitraums von zwei Sekunden nach dem Eingriff extrahiert.

5.1.4 Stichprobe, Datenanalyse und Ergebnisdarstellung

In die statistische Analyse gingen die Daten von 55 Versuchspersonen ein. Die Teilnehmer waren Angestellte der Volkswagen AG, ohne direkten Bezug zu der Entwicklung und Vermarktung von Fahrerassistenzsystemen. Die Gruppe der 25–50-Jährigen stellte mit 69% den deutlich größten Anteil der Stichprobe dar. Der Anteil der unter 25-Jährigen lag bei 23%. Über 50-jährige Fahrer waren mit 8% deutlich unterrepräsentiert und stellten den kleinsten Anteil der Stichprobe.

Aufgrund der komplexen Versuchsanordnung konnten verschiedene Datenausfälle nicht verhindert werden. Um dennoch robuste Testungen vornehmen zu können, wurde der Einsatz eines Verfahrens für unabhängige Stichproben der Verwendung einer Messwiederholungsanalyse vorgezogen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass keine fehlenden Werte ersetzt werden müssen und die Bewertung der Beherrschbarkeit damit ausschließlich auf realen Daten beruht. Demnach erfolgte die statistische Analyse im Rahmen einer multivariaten Varianzanalyse für unabhängige Stichproben. Als abhängige Variablen gehen die Intensität der lateralen Komponente („A“ und „B“) und die Intensität der longitudinalen Komponente („0“, „I“ und „II“) in die Berechnungen ein. Weiterhin werden die Richtungen der Lenkeingriffe („rechts“ und „links“) und der Längsbeschleunigung („kein Längseingriff“, „Verzögerung“ und „Beschleunigung“) als unabhängige Einflussgrößen berücksichtigt. Die oben beschriebenen Kennwerte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion gehen als abhängige Variablen in die Analyse ein.

Die Ergebnisse der multivariaten Tests werden im Anhang berichtet. Im Falle von signifikanten globalen Effekten werden die signifikanten Tests der Zwischensubjekteffekte in Tabellen im Fließtext wiedergegeben. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Haupteffekte und Interaktionen wird innerhalb der Ergebnisdarstellung auf die Wiedergabe nicht-signifikanter Befunde verzichtet. Für eine vollständige Darstellung der Zwischensubjekttests wird ebenfalls auf den Anhang verwiesen. Die Tabellen der Ergebnisdarstellung weisen die jeweiligen Freiheitsgrade (df), den F-Wert und den zugehörigen Signifikanz-Wert (p-Wert) aus. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde insgesamt auf $\alpha=.05$ gesetzt.

Um eine Einordnung der signifikanten Wechselwirkungen zu ermöglichen, wird darüber hinaus die „Art der Interaktion“ in den Ergebnistabellen dargestellt. Liegen Wechselwirkungen innerhalb einer Eingriffskomponente vor, wird die Interaktion mit „I“ gekennzeichnet. Wechselwirkungen dieser Art (z. B. der Querkomponente) zeigen, dass für ein Fehlerbild Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften „Richtung“ und „Stärke“ bestehen. Die Ausprägung einer Variablen (z. B. Störungsbewertung) folgt in diesem Fall keinem generellen Muster, sondern ist eventuell nur für eine Intensität (z. B. Intensität „B“) mit einer Eingriffsrichtung (z. B. Lenkeingriff nach „links“) höher als für die entgegengesetzte Richtung (hier: Lenkeingriff nach „rechts“). Ergebnisse dieser Art erlauben spezifische Rückschlüsse auf die Rolle der Eigenschaften einer Eingriffsdimension.

Übergreifende Interaktionen, die eine wechselseitige Beeinflussung der abhängigen Variable zwischen den Eigenschaften von Quer- und Längseingriffen beschreiben, werden mit „Z“ bezeichnet. Interaktionen dieser Art sind für die Bewertung von kombinierten Eingriffen besonders interessant, da die Mittelwerte der jeweiligen Variablen nicht durch eine einfache additive Verknüpfung beider Einzelkomponenten erklärt werden können. Die Auswirkungen einer Eingriffskomponente sind in diesem Fall von der Ausprägung der anderen Komponente abhängig und können nur durch das Zusammenspiel beider Größen interpretiert werden. Da beide Komponenten in zwei Eigenschaften variiert wurden (Richtung und Stärke), ergibt sich eine maximale Anzahl von 9 übergreifenden Wechselwirkungen. Da auf globaler Ebene drei- oder vierfaktorielle Wechselwirkungen meist kein signifikantes Niveau erreichen (siehe Anhang A), treten im Wesentlichen die in Tabelle 15 dargestellten Interaktionen auf. Die dargestellten Faktorenkombinationen werden im Folgenden anhand der Typisierung „1“ bis „4“ gekennzeichnet.

Tabelle 15: Darstellung der häufigsten übergreifenden Interaktionen *zwischen* (Z) den Eigenschaften beider Eingriffsdimensionen. Die Faktorenkombinationen werden im Folgenden anhand der Typisierung „1“ bis „4“ beschrieben.

Typ	Faktorenkombination
1	Intensität der lateralen Komponente * Intensität der longitudinalen Komponente
2	Richtung der lateralen Komponente * Richtung der longitudinalen Komponente
3	Intensität der lateralen Komponente * Richtung der longitudinalen Komponente
4	Intensität der longitudinalen Komponente * Richtung der lateralen Komponente
5	Intensität des Längseingriffs * Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs
6	Intensität des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs

Um eine grundsätzliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden innerhalb des Ergebnisteils zwei Darstellungen für jede abhängige Variable widergegeben. Zum einen werden die jeweiligen Eingriffsstärken gemittelt über die einzelnen Abstufungen dargestellt (Interaktion des Typs „1“). Im Falle von signifikanten Interaktionen der Eingriffsintensitäten ermöglicht diese Darstellung einen direkten Bezug der Maße aufeinander. Sofern keine Wechselwirkung beider Variablen vorliegt, ist eine allgemeine Beurteilung der Haupteffekte möglich. Zum anderen werden die Auswirkungen der Eingriffsrichtungen in einem zweiten Diagramm gegenübergestellt (Interaktion des Typs 2). Liegen Interaktionen des Typs „3“ oder „4“ vor, werden diese im Ergebnisteil besprochen, ohne dass eine Diagrammdarstellung im Fließtext erfolgt. Zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung finden sich diese Ergebnisdiagramme im Anhang. Treten Dreifachinteraktionen auf, erfolgt die Ergebnisdarstellung anhand differenzierterer Diagramme. Auf die Wiedergabe der oben beschriebenen Standarddarstellung wird in diesem Fall verzichtet. Als Streuungsmaß wird in allen Ergebnisdiagrammen der Standardfehler des Mittelwerts verwendet.

Die Analyseergebnisse werden in den folgenden Kapiteln getrennt für die einzelnen Fahrscenarien berichtet. Dieses Vorgehen erlaubt eine differenzierte Betrachtung der Wirkfaktoren und ihrer Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für die einzelnen Prüfscenarien. Für jedes Fahrscenario werden die Auswirkungen in den erhobenen Variablen in fester Reihenfolge besprochen. Die Bewertung erfolgt für jede abhängige Variable in vier aufeinanderfolgenden Schritten:

1. In einem ersten Schritt werden die Extrema der Maße besprochen und unter Gesichtspunkten der Beherrschbarkeit diskutiert. Falls vorhanden, werden hierfür Grenzwerte herangezogen oder Parallelen zu den Ergebnissen vergleichbarer Studien hergestellt.
2. Der zweite Analyseschritt überprüft das Auftreten von Wechselwirkungen zwischen den Charakteristika der Fehlerbilder. Entsprechend der obigen Überlegungen wird der Existenz von Interaktionen zwischen den Eingriffsdimensionen besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Treten übergreifende Wechselwirkungen in den einzelnen Maßen auf, wird davon ausgegangen, dass eine umfassende Bewertung der Eingriffs kombinationen nicht getrennt für Längs- und Querkomponenten der kombinierten Eingriffe vorgenommen werden sollte. Das bloße Auftreten dieser Interaktionen erlaubt jedoch noch keine inhaltlichen Rückschlüsse auf die Beherrschbarkeit der Eingriffsbilder. Ergebnisse dieser Art zeigen lediglich, dass die Effekte des jeweiligen Maßes nur mit bestimmten Eigenschaften beider Eingriffsdimensionen auftreten und nicht durch eine einzelne Komponente erreicht werden können. Da sich die Mehrzahl der Verhaltensmaße primär auf die laterale Komponente richtet, sind Auswirkungen der longitudinalen Komponente in diesen Maßen besonders interessant. Haupteffekte oder Interaktionen dieser Art zeigen für solche Fälle, dass das Lenkverhalten der Fahrer auch von den Eigenschaften der Beschleunigungen bzw. Verzögerungen abhängig ist.
3. Im Anschluss an die Darstellung der Wechselwirkungen wird eine inhaltliche Analyse der Wirkmuster vorgenommen. Hierbei stehen zwei Aspekte im Mittelpunkt der Untersuchung. Zum einen müssen Ausprägungen der Faktoren identifiziert werden, die zu hervorstechenden Bewertungen oder

- Fahrerreaktionen führen. Treten erhöhte Lenkradwinkel z. B. nur für eine bestimmte Richtungskombination von Quer- und Längseingriffen auf, muss diesem Eingriffsbild mit besonderer Aufmerksamkeit begegnet werden. Ebenso kann die Analyse der Intensitäten zeigen, dass Effekte nur ab einer bestimmten Stufe auftreten und geringere Intensitäten zu vernachlässigen sind. Zum anderen werden die Befunde der einzelnen Maße in Beziehung zueinander gesetzt und unter Gesichtspunkten der Beherrschbarkeit bewertet. Werden z. B. für eine Richtungskombination mit erhöhten Lenkradwinkeln Reaktionszeiten festgestellt, die sich nicht von der Bewältigung weniger kritischer Eingriffe unterscheiden oder sogar schneller erfolgen, wird auf adäquate Fahrerreaktionen geschlossen. Als generelle Leitgröße der Beherrschbarkeit wird in dieser Analyse die Störungsbewertung verwendet (vgl. Kapitel 5.1.3). Da die einzelnen Maße zur besseren Übersicht nacheinander besprochen werden, steigt der Bedarf an Integration mit der Anzahl der Einzelanalysen.
4. Der letzte Analyseschritt greift den Gedanken der Führungsgröße auf und diskutiert zunächst auf deskriptivem Niveau Ähnlichkeiten der Verhaltensmaße zu den Störungsbewertungen. Hierdurch sollen erste Erkenntnisse über die Vorhersagekraft des jeweiligen Parameters ermöglicht werden. Anschließend wird eine Kurzzusammenfassung der Ergebnisse für jede Variable vorgenommen.

Die Analyse der abhängigen Variablen erfolgt für alle Fahrszenarien nach gleichem Muster. Abschließend werden die Ergebnisse für jedes Szenario zusammenfassend besprochen. Hierbei erfolgen zudem eine statistische Analyse der Zusammenhänge von subjektiven und objektiven Maßen sowie eine Diskussion möglicher Führungsgrößen.

5.2 Einflüsse von Stärke und Richtung der Eingriffskombinationen

5.2.1 Auswirkungen in der Geradeausfahrt

Subjektive Störungsbewertung

Die subjektiven Störungsbewertungen der Fehlerbilder liegen insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Werden die subjektiven Bewertungen anhand der Eingriffsstärken aufgeschlüsselt, ergeben sich mittlere Urteile in den Bereichen „Spürbar“ und „Störung des Fahrens“. Abbildung 22a zeigt die Störungsbewertungen in Abhängigkeit der Eingriffsstärken von Quer- und Längseingriffen, gemittelt über die verschiedenen Eingriffsrichtungen. Eine wechselseitige Beeinflussung der Fahrerwahrnehmung lässt sich nicht auf signifikantem Niveau nachweisen, es liegt keine Interaktion des Typs 1 vor (Tabelle 16). Die Auswirkungen höherer Intensitäten von Quer- und Längseingriffen können damit anhand der Haupteffekte interpretiert werden. Für die Intensität der lateralen Eingriffe zeigt sich das zu erwartende Bild. Aus stärkeren Eingriffen in die Querführung resultieren höhere Störungsbewertungen ($M_B = 3.90$, $SD = 1.60$, $p_{A-B} < .001$).

Obwohl dieses Verhältnis grundsätzlich auch für die longitudinale Intensität gilt, zeigt sich hier ein unerwarteter Aspekt. Die mittleren Bewertungen der Lenkungseingriffe ohne weitere Längskomponente („eindimensionale Eingriffe“) unterscheiden sich nicht von den Bewertungen schwächerer, aber dennoch kompletter Kombinationen ($M_0 = 2.94$, $SD = 1.72$, $p_{0-1} = .223$). Die Tatsache, dass in beiden Dimensionen der Fahrzeugführung eingegriffen wird, führt somit nicht zwangsläufig zu einer größeren subjektiven

Beeinträchtigung des Fahrers. Da die gängigen Signifikanzprüfungen lediglich auf vorhandene Unterschiede zwischen den Mittelwerten testen, kann nicht von einer „Gleichheit“ der Urteile ausgegangen werden. Dennoch lassen sich keine Unterschiede zwischen den Bewertungen einfacher Lenkungseingriffe und kompletter Kombinationen feststellen. Da der Vergleich zwischen alleinigen Lenkungseingriffen und stärkeren Kombinationen deutliche Unterschiede zeigt ($M_{II} = 3.97$, $SD = 1.59$, $p_{0-II} < .001$), begrenzt sich dieses Phänomen jedoch ausschließlich auf schwächere Kombinationen.

Tabelle 16: Ergebnisse der Zwischensubjekttests der Störungsbewertungen für die Geradeausfahrt (df = 1, Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	df	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	1	56.62	<.001
Stärke des Längseingriffs	-	-	1	71.25	<.001
Richtung des Längseingriffs	-	-	1	8.36	.004
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	1	12.11	.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	1	8.05	.005

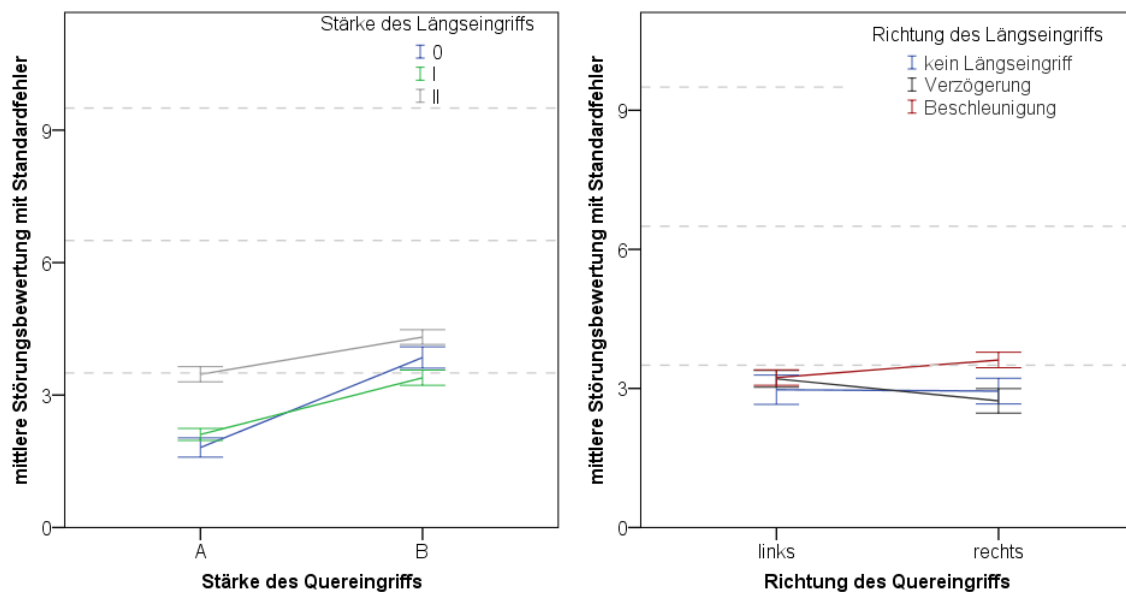


Abbildung 22a und b: Dargestellt sind die mittleren Störungsbewertungen der Geradeausfahrt für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 22a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 22b).

Die in Abbildung 22b dargestellten Verläufe der Störungsbewertungen für die Eingriffsrichtungen zeigen ebenfalls einen unerwarteten Effekt. Im Unterschied zu den vorangegangenen Darstellungen lässt sich eine signifikante Interaktion des Typs 2 feststellen. Dabei zeigen sich für die beiden lateralen Eingriffsrichtungen (rechts / links) unterschiedliche mittlere Bewertungen. Obwohl diese Differenzen nur mit Beschleunigungsmanövern auftreten, sind Richtungsabhängigkeiten in den Subjekturteilen einer Geradeausfahrt zunächst nicht anzunehmen. Sofern Beschleunigungen in Kombination mit Eingriffen

nach rechts dargeboten werden, finden sich dennoch signifikant erhöhte Störungsbewertungen ($M_{rBesch} = 3.61$, $SD = 1.68$, $p_{rBesch-rVerz} = .005$, $p_{rBesch-r0} = .043$).

Die darüber hinaus auftretende Wechselwirkung zwischen den Eigenschaften der Längsführung (Interaktion von Stärke und Richtung, siehe Anhang) geht auf unterschiedliche Störungsbewertungen von schwächeren Beschleunigungen zurück. Liegen stärkere Eingriffe in die Längsführung vor, werden Brems- und Beschleunigungsmanöver vergleichbar bewertet und liegen jeweils über ihrem schwächeren Pendant. Werden Brems- und Beschleunigungsmanöver jedoch mit geringerer Intensität dargeboten, treten für die beiden Richtungen unterschiedliche Störungsbewertungen auf. Beschleunigungen mit niedriger Intensität ($M_{Besch-l} = 2.96$, $SD = 1.42$) werden unangenehmer erlebt als vergleichbar intensive Bremsmanöver ($M_{Verz-l} = 2.05$, $SD = 1.32$; $p_{Verz-l-Beschl} < .001$). Da mit höheren Intensitäten keine Unterschiede mehr vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass Einflüsse der Richtung bei stärkeren Eingriffen vernachlässigt werden können.

Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Störungsbewertungen der Geradeausfahrt:

- Alle untersuchten Eingriffsbilder werden mit Maximalwerten im Bereich der „Störung des Fahrens“ deutlich unterhalb eines kritischen Niveaus bewertet.
- Stärkere Quereingriffe gehen mit höheren Störungsbewertungen einher.
- Die subjektive Beeinträchtigung durch alleinige Lenkungseingriffe kann nicht von den Bewertungen schwächerer, aber dennoch kompletter Kombinationen unterschieden werden. Die Beeinflussung beider Dimensionen der Fahrzeugführung führt nicht zwangsläufig zu erhöhten Störungsbewertungen.
- Da die Richtungen der Eingriffskomponenten einen wechselseitigen Einfluss auf die wahrgenommene Störung der Fehlerbilder ausüben, können die Auswirkungen der kombinierten Eingriffe nur durch eine gemeinsame Analyse beider Dimensionen bewertet werden. Erkenntnisse aus Untersuchungen, die Quer- und Längseingriffe unabhängig voneinander bewerten, können nicht uneingeschränkt auf kombinierte Eingriffe übertragen werden.
- Mit steigender Intensität werden Brems- und Beschleunigungsmanöver als vergleichbar störend empfunden. Unter subjektiven Gesichtspunkten kann bei stärkeren Eingriffen in die Längsführung die Richtung vernachlässigt werden.
- Die Kombination aus Beschleunigungen und Lenkeingriffen nach rechts geht mit erhöhten Störungsbewertungen einher, die insgesamt jedoch auf einem sehr geringen Niveau verbleiben.

Maximaler Lenkradwinkel

Für die maximalen Lenkradwinkel können ebenfalls Auswirkungen mehrerer Faktoren festgestellt werden (Tabelle 17). Da hier zum Teil andere Interaktionen wirksam werden, unterscheidet sich das Muster der Abhängigkeit jedoch von dem der Störungsbewertungen. Obwohl es sich bei dem Maß des maximalen Lenkradwinkels um ein primär laterales Maß handelt, können dennoch Auswirkungen von longitudinalen Faktoren identifiziert werden.

Tabelle 17: Ergebnisse der Zwischensubjekttests des maximalen Lenkradwinkels für die einfache Geradeausfahrt (df = 1, Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	P
Stärke des Quereingriffs	-	-	56.48	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	34.68	<.001
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I	-	18.07	<.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	4.47	.035

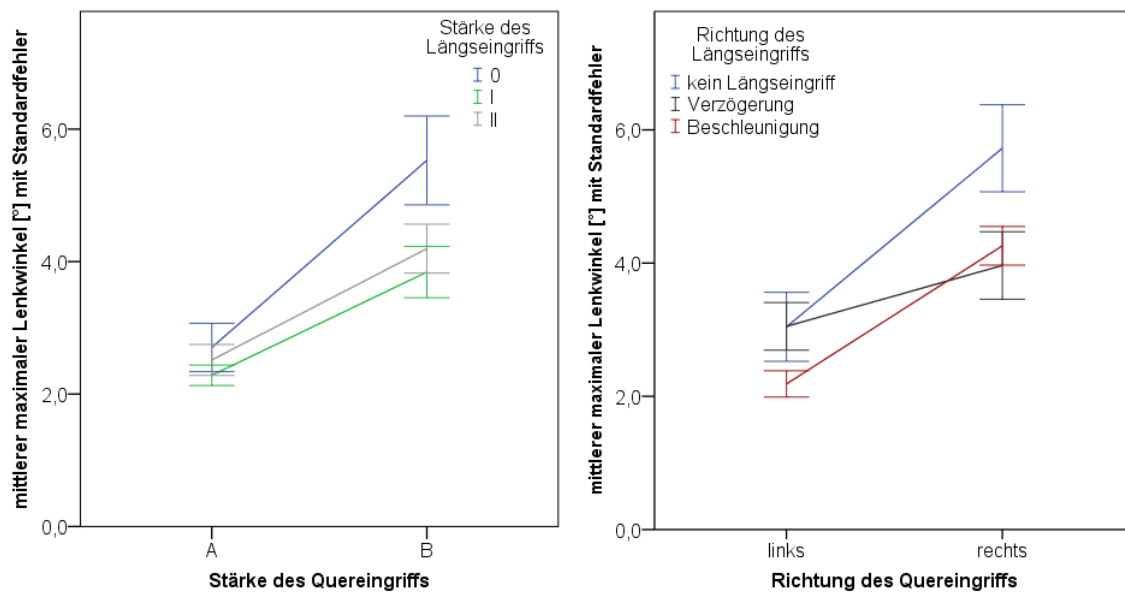


Abbildung 23a und b: Darstellung der mittleren maximalen Auslenkungen [°] für die Intensitäten beider Eingriffsdimensionen (Abbildung 23a, links) und deren Richtungen (Abbildung 23b, rechts).

Die maximalen Auslenkungen, die sich in Abhängigkeit der Eingriffsstärken zeigen (vgl. Abbildung 23a), können auf die steigende Intensität der Lenkeingriffe zurückgeführt werden. Wie im Bereich der Störungsbewertungen zeigt sich keine signifikante Wechselwirkung zwischen den Stärken von Quer- und Längskomponente. Es liegt keine Interaktion des Typs 1 vor. Ebenso können Einflüsse der longitudinalen Intensität ausgeschlossen werden (in Tabelle 17 nicht dargestellt, da nur signifikante Effekte und Wechselwirkungen berichtet werden). Die Interpretation der in Abbildung 23a dargestellten Verläufe wird daher nur für die Stärke der Quereingriffe vorgenommen. Hierbei lassen sich die zu erwartenden Effekte feststellen, da mit steigender Eingriffsintensität größere mittlere maximale Lenkradwinkel auftreten ($M_A = 2.43^\circ$, $SD = 1.74$, $M_B = 4.32^\circ$, $SD = 3.68$, $p_{AB} > .001$). Liegen stärkere Eingriffe vor, werden geringfügig größere Auslenkungen zugelassen. Dieses Muster entspricht dem der Störungsbewertungen, ohne dass jedoch Einflüsse der Längsführung auftreten.

Die Interaktion der Eingriffsrichtungen (Abbildung 23b, Interaktion des Typs „2“) weist ebenfalls eine Besonderheit auf, die bereits in den Störungsbewertungen festgestellt werden konnte. Für einen Teil der Eingriffe lässt sich auch im Bereich des Lenkungsmaßes eine deutliche Richtungsabhängigkeit feststellen. Eingriffe nach rechts gehen mit erhöhten maximalen Lenkradwinkeln einher. Dieses

Phänomen lässt sich für Eingriffskombinationen mit Beschleunigung ($M_{lBesch} = 2.26^\circ$, $SD = 2.0$, $M_{rBesch} = 4.41^\circ$, $SD = 3.03$; $p_{lBesch-rBesch} < .001$) und für alleinige Lenkeingriffe zeigen ($M_{l0} = 3.04^\circ$, $SD = 3.02$, $M_{r0} = 5.72^\circ$, $SD = 3.87$; $p_{l0-r0} = .002$). Darüber hinaus setzen sich die Auslenkungen nach alleinigen Lenkungseingriffen deutlich von den maximalen Lenkradwinkeln infolge ganzer Kombinationen ab. Es finden sich sowohl signifikante Differenzen für den Vergleich zu Verzögerungen ($p_{r0-rVerz} = .046$) als auch zu Kombinationen mit Beschleunigungen ($p_{r0-rBesch} = .034$). Fahrer lassen bei alleinigen Lenkungseingriffen nach rechts größere Auslenkungen zu.

Des Weiteren liegt eine Interaktion innerhalb der lateralen Eingriffskomponente vor. Die Richtung und die Stärke der Lenkeingriffe üben einen gemeinsamen Einfluss auf das Lenkverhalten aus. Auch hier lassen sich insbesondere für Lenkeingriffe nach rechts erhöhte maximale Lenkradwinkel feststellen. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine höhere Intensität (Intensität „B“) der Lenkeingriffe (siehe Anhang).

Obwohl sich sowohl in den Störungsbewertungen als auch für die maximalen Lenkradwinkel Richtungsabhängigkeiten zeigen, kann kein direkter Bezug der Maße vorgenommen werden. Die subjektiven Wahrnehmungen der Eingriffe stehen unter deutlichem Einfluss der Brems- und Beschleunigungsintensität. Vergleichbare Einflüsse treten im Bereich des Lenkverhaltens nicht auf. Ein weiterer Unterschied zeigt sich für die Aufschlüsselung der Daten anhand der Eingriffsrichtung. Die Störungsbewertungen der Probanden weisen darauf hin, dass insbesondere Kombinationen mit Beschleunigungskomponenten und Lenkeingriffen nach rechts als beanspruchend erlebt werden. Die Aufbereitung der maximalen Lenkradwinkel zeigt zwar ebenfalls eine starke Richtungsabhängigkeit, ohne dass aber eine vergleichbare Rangordnung in den zugelassenen Auslenkungen vorliegt. Hier setzen sich eindeutig die alleinigen Lenkungseingriffe von allen anderen Richtungskombinationen ab.

Zusammenfassung der Ergebnisse zum maximalen Lenkradwinkel der Geradeausfahrt:

- Die mittleren maximalen Lenkradwinkel infolge der dargebotenen Eingriffe liegen für alle untersuchten Fälle unter 7° .
- Es treten Abhängigkeiten zwischen beiden Eingriffsdimensionen auf. Eine Analyse der Auslenkung, die Fahrer infolge von kombinierten Eingriffen zulassen, erfordert daher den Einbezug gleichzeitig auftretender longitudinaler Einflüsse.
- Die größten maximalen Lenkradwinkel zeigen sich für eindimensionale Eingriffe (alleinige Lenkungseingriffe). Die Auslenkungen infolge alleiniger Lenkeingriffe können die mittleren maximalen Lenkradwinkel nach integrierten Eingriffen übersteigen.
- Trotz der einfachen Geradeausfahrt lässt sich eine laterale Richtungsabhängigkeit feststellen. Liegen Lenkungseingriffe nach rechts vor, treten im Vergleich zu den übrigen Auslenkungen erhöhte Werte auf.
- Ein Bezug der Verhaltensmaße auf die subjektiven Störungsbewertungen ist nur bedingt möglich. Zwar zeigen sich in beiden Maßen Richtungsabhängigkeiten, die sich inhaltlich jedoch unterscheiden. Die Kombination mit den auffälligsten Störungsbewertungen geht nicht mit den größten Auslenkungen einher.

Zeitpunkt der maximalen Auslenkung

Für die Zeitpunkte, zu denen die maximalen Lenkradwinkel auftreten, zeigt sich eine deutlich begrenzte Anzahl von wirkenden Faktoren (Tabelle 18). Die Darstellungen der lenkungsbezogenen Reaktionszeiten (Abbildung 24a und b) verdeutlichen die geringen Unterschiede zwischen den Zeitpunkten infolge der Eingriffe. Allein die Richtung des Quereingriffs übt einen signifikanten Einfluss auf den Zeitpunkt der maximalen Auslenkung aus ($p_{l-r} = 0.19$). Für Eingriffskombinationen, deren laterale Komponente nach rechts weist, zeigen sich früher auftretende maximale Lenkradwinkel ($M_r = 0.43s$, $SD = 0.55$; $M_l = 0.59s$, $SD = 0.77$) und damit verbesserte Fahrerreaktionen. Fahrer kontrollieren diese Eingriffe schneller als die übrigen Kombinationen.

Tabelle 18: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für den Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels im Rahmen einer einfachen Geradeausfahrt ($df = 1$, Fehler $df = 365$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Richtung des Quereingriffs	-	-	4.25	.040

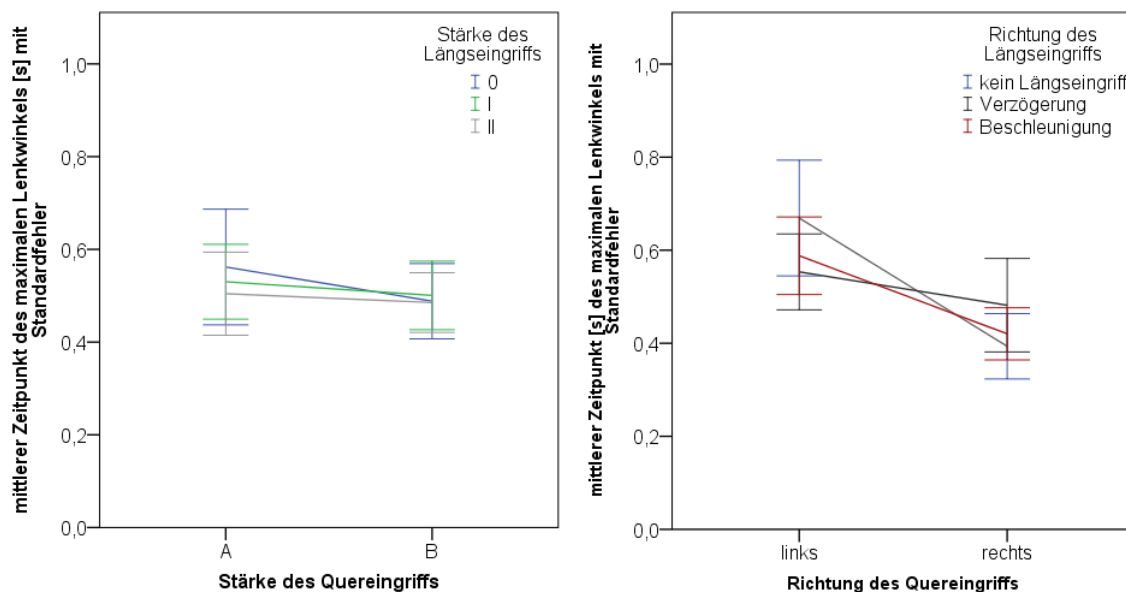


Abbildung 24a und b: Darstellung der Zeitpunkte [s] der mittleren maximalen Auslenkungen [°] für die Intensitäten beider Eingriffsdimensionen (Abbildung 24a, links) und deren Richtungen (Abbildung 24b, rechts).

Obwohl sich die Anzahl der wirkenden Faktoren damit auf die laterale Richtung beschränkt, sind im Hinblick auf die Beherrschbarkeit verschiedene Aussagen möglich. Zum einen kann davon ausgegangen werden, dass Eingriffe mit erhöhten maximalen Lenkradwinkeln früher begrenzt werden. Insbesondere für die oben beschriebenen Beschleunigungen mit Lenkeingriffen nach rechts treten zwar erhöhte Auslenkungen auf, diese werden jedoch schneller kontrolliert. Da für die Richtungen der Eingriffe keine Interaktion vorliegt, gilt dieser Befund für alle Kombinationen mit lateralen Eingriffen nach rechts.

Zum anderen zeigen die Ergebnisse, dass keine Unterschiede in Abhängigkeit der Eingriffsstärken auftreten. Die hervorstechenden Bewertungen und maximalen Lenkradwinkel infolge alleiniger

Lenkungseingriffe lassen sich damit nicht in den lenkungsbezogenen Reaktionszeiten finden. Aufgrund der bereits beschriebenen Testlogik (Testung auf Unterschiede) darf zwar keine Gleichheit der Mittelwerte angenommen werden. Die Fahrerreaktion infolge dieser Eingriffe erfolgt dennoch nicht später oder früher als es für Kombinationen mit weniger auffälligen Mustern der Fall ist.

Ein direkter Bezug der Verhaltensmaße auf die Wahrnehmung und Bewertung der Fehlerbilder ist auch anhand der lenkungsbezogenen Reaktionsgeschwindigkeit nicht möglich. Wesentliche Phänomene der subjektiven Wahrnehmung, wie die Rolle von alleinigen Lenkungseingriffen oder geringen Störungsbewertungen mit Verzögerungen, lassen sich nicht anhand der Zeitpunkte, zu denen die maximalen Lenkradwinkel auftreten, nachvollziehen. Wie Fahrer die verschiedenen Fehlerbilder bewerten, scheint daher weitestgehend unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der ihnen eine Reaktion auf assistenzbedingte Eingriffe möglich ist.

Zusammenfassung der Ergebnisse zum Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels der Geradeausfahrt:

- Die längsten lenkradbezogenen Reaktionszeiten treten für Eingriffskombinationen auf, die aus Beschleunigungen und Eingriffen nach links bestehen. Im Mittel treten diese Reaktionen nach ca. 610 ms auf und liegen damit innerhalb des Spektrums von Reaktionen auf haptische Signale, wenngleich bereits deutlich schnellere Reaktionen gemessen wurden (z. B. Neukum, 2009).
- Die lenkungsbezogene Reaktionszeit wird ausschließlich von der lateralen Komponente der Eingriffskombinationen beeinflusst. Der Einfluss der Lenkeingriffe begrenzt sich dabei auf die Richtung der Eingriffe.
- Der Vergleich der Reaktionszeiten von Eingriffskombinationen, die mit erhöhten Lenkradwinkeln oder Störungsbewertungen einhergehen, zeigt keine Unterschiede zu weniger auffälligen Kombinationen. Eher sind frühere Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels und damit verbesserte Fahrerreaktionen festzustellen.
- Ein direkter Bezug zwischen den subjektiven Störungsbewertungen und den Verhaltensmaßen ist auch anhand der lenkungsbezogenen Reaktionsgeschwindigkeit nicht möglich. Subjektive Phänomene, wie eine erhöhte Bewertung von alleinigen Lenkungseingriffen, lassen sich nur in Teilen nachvollziehen oder schlagen sich gar nicht in den Reaktionszeiten nieder.

Spannweite der Gierrate

Die Bewertung der Gierrate ist insbesondere für die Beurteilung der resultierenden Fahrzeugreaktion und für die Objektivierung der Fahrerwahrnehmung relevant. Die Veränderungen der Gierrate innerhalb der Geradeausfahrt sind nahezu von allen betrachteten Faktoren abhängig. Nur die Richtung der Längsführung hat keinen Einfluss auf die Spannweite der Gierrate. Es treten keine übergreifenden Interaktionen zwischen den Eingriffsdimensionen auf (Tabelle 19). Ob die longitudinale Komponente von Eingriffskombinationen aus Brems- oder Beschleunigungsmanövern besteht, ist somit für die Veränderungen, denen die Gierrate unterliegt, unerheblich.

Tabelle 19: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der resultierenden Gierrate in Abhängigkeit der Intensitäten und Richtungen beider Dimensionen (df = 1; Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	209.32	<.001
Stärke des Längseingriffs	-	-	3.64	.057
Richtung des Quereingriffs	-	-	5.35	.021
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I	-	7.42	.007

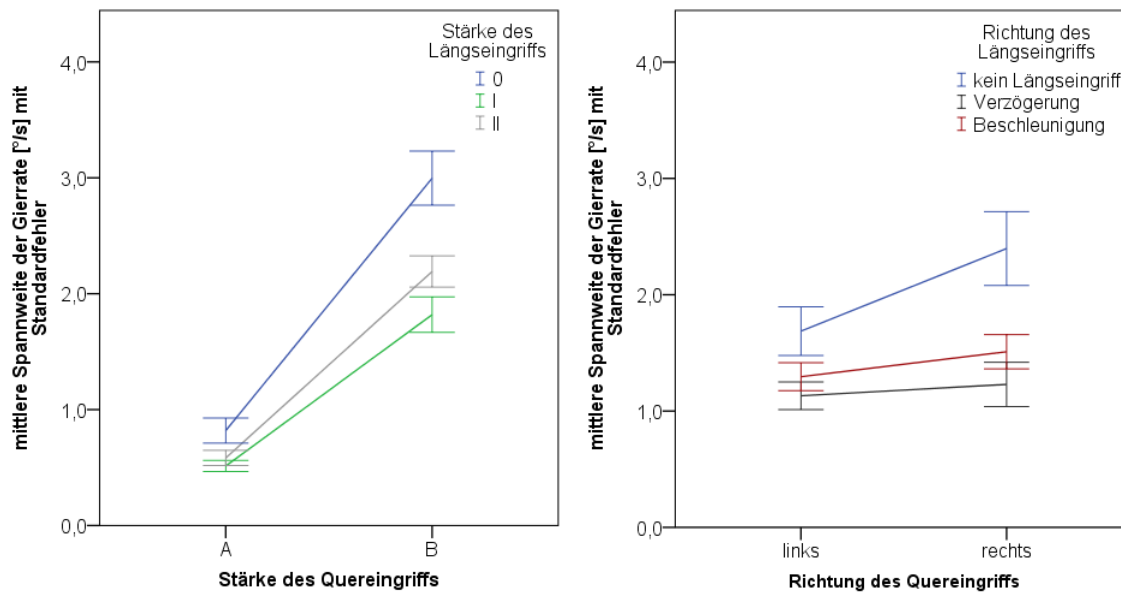


Abbildung 25a und b: Darstellung der mittleren Spannweite der Gierrate in Abhängigkeit der Eingriffsintensitäten (Abbildung 25a, links) und der Eingriffsrichtung (Abbildung 25b, rechts).

Für stärkere laterale Eingriffe lassen sich deutlich größere Veränderungen der Gierrate feststellen. Über alle Abstufungen der Längsintensitäten gemittelt (vgl. Abbildung 25a), treten für Eingriffe der Intensität „B“ Veränderungen von 2.21°/s auf (SD = 1.41), die die mittleren Spannweiten von schwächeren Eingriffen um 1.60°/s übersteigen ($M_A = 0.59^\circ/\text{s}$, SD = 0.53). Mit stärkeren Eingriffen in die Querführung lassen Fahrer größere Auslenkungen zu, die von stärkeren Gierreaktionen begleitet werden. Dementsprechend werden stärkere Quereingriffe als störender bewertet.

Die Einflüsse der longitudinalen Eingriffsstärke zeigen sich in den bereits hervorgehobenen Besonderheiten der eindimensionalen Lenkungseingriffe. Im Mittel werden hier Spannweiten von 2.03°/s erreicht (SD = 1.60), die sich signifikant von den Werten der übrigen Längsintensitäten absetzen ($p_{0-I} > .001$, $p_{0-II} = .014$). Die Störungsbewertungen und die maximalen Lenkradwinkel weisen für die Eingriffsintensitäten weitgehend vergleichbare Muster auf (vgl. Abbildung 22a und Abbildung 23a). Die subjektive Wahrnehmung fügt sich allerdings nicht komplett in dieses Bild, da keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den eindimensionalen Lenkeingriffen und den schwächeren Kombinationen auftreten.

Einflüsse der Richtung (vgl. Abbildung 25b) lassen sich nur für die laterale Komponente der Kombinationen feststellen. Unabhängig von gleichzeitigen Beschleunigungen oder Verzögerungen treten geringfügig erhöhte Werte mit Eingriffen nach rechts auf ($M_r = 1.62^\circ/\text{s}$, $SD = 1.56$, $M_l = 1.30$, $SD = 1.16$, $p_{r-l} = .023$). Die in allen vorherigen Maßen festgestellte Richtungsabhängigkeit zeigt sich damit auch für die Spannweite der Gierrate. Wird zudem das Zusammenspiel von Stärke und Richtung der Querkomponenten in Betracht gezogen, zeigen sich nur mit intensiveren Eingriffen (Intensität „B“) Unterschiede zwischen Lenkeingriffen nach links und rechts ($M_{rB} = 2.54^\circ/\text{s}$, $SD = 1.60$, $M_{lB} = 1.95^\circ/\text{s}$, $SD = 1.19$, $p_{rB-lB} = .004$). Für schwächere Kräfte (Intensität „A“) treten nahezu keine Unterschiede auf ($p_{rA-lA} = .70$). Die Auswirkungen der lateralen Richtung gehen demnach insbesondere auf stärkere Quereingriffe zurück.

Für die Aufschlüsselung der Spannweiten in Abhängigkeit der Eingriffsstärken können deutliche Parallelen zu den maximalen Lenkradwinkeln festgestellt werden. Stärkere Eingriffe führen zu erhöhten Auslenkungen, die ebenfalls mit größeren Veränderungen in der Gierrate einhergehen. Dabei fällt insbesondere die Rolle von alleinigen Lenkungseingriffen auf, für die in beiden Fällen die höchsten Mittelwerte festgestellt werden können. Mit den Parallelen dieser Maße zeigt sich aber auch der eingeschränkte Bezug zwischen den Veränderungen der Gierrate und den Störungsbewertungen der Eingriffsbilder. Bereits für die maximalen Lenkradwinkel und deren Zeitpunkte konnten deutliche Einschränkungen identifiziert werden. Das Muster der Gierrate bildet die Zusammenhänge der Störungsbewertungen ebenfalls nur in Teilen ab. Den erhöhten Störungsbewertungen mit intensiveren Eingriffen in die Längsführung (Intensität „II“) wird die Spannweite der Gierrate ebenfalls nicht gerecht. Noch deutlichere Unterschiede zwischen beiden Maßen zeigen sich, wenn die Richtungen als Grundlage für einen Vergleich der Maße herangezogen werden. Die Störungsbewertungen verzeichnen erhöhte Werte für Beschleunigungen nach rechts, während die Veränderungen der Gierrate auf die besondere Bedeutung alleiniger Lenkeingriffe hinweisen.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Gierrate der Geradeausfahrt:

- Für die Spannweite der Gierrate können keine übergreifenden Interaktionen zwischen beiden Eingriffsdimensionen festgestellt werden. Die Eigenschaften von Quer- und Längseingriffen wirken unabhängig auf die Veränderungen der Gierrate.
- Höhere Intensitäten der Quereingriffe gehen mit größeren Veränderungen der Gierrate einher.
- In Abhängigkeit der longitudinalen Intensitäten finden sich die stärksten Gierraten für Lenkungseingriffe ohne zusätzliche Längskomponente.
- Einflüsse der Eingriffsrichtung können nur für die laterale Komponente festgestellt werden. Wirksam werden in diesem Zusammenhang nur stärkere Lenkungseingriffe, die für Eingriffe nach rechts größere Auswirkungen als in entgegengesetzter Richtung zeigen.
- Intensivere Eingriffe mit lateralen Komponenten nach rechts gehen mit erhöhten Auslenkungen und größeren Veränderungen der Gierrate einher. Dem gegenüber stehen verbesserte lenkungsbezogene Reaktionszeiten.
- Die größten Parallelen dieses Maßes zeigen sich zu den Wirkmustern der mittleren maximalen Lenkradwinkel und den Störungsbewertungen in Abhängigkeit der Intensitäten. Werden die

Auswirkungen auf die Gierrate unter Gesichtspunkten der Eingriffsrichtung verglichen, zeigen sich deutlich geringere Parallelen.

Spannweite der Längsbeschleunigung

Die Veränderungen der Längsbeschleunigungen unterliegen ausschließlich Einflüssen der Längsführung. Auswirkungen der Querregelung lassen sich weder in Form von Haupteffekten noch im Rahmen von Interaktionen feststellen (Tabelle 20). Das Maß der Längsbeschleunigungsspannweite erweist sich damit für Auswirkungen der lateralen Dimension als wenig sensitiv. Einflüsse der longitudinalen Komponente zeigen sich dagegen umso deutlicher. Da keine Wechselwirkungen vorliegen, werden die in Abbildung 26a gezeigten Ergebnisse anhand der Haupteffekte interpretiert. Das Verhältnis der Mittelwerte entspricht hier klar den Erwartungen. Höhere Intensitäten der Längskomponenten setzen sich deutlich von schwächeren oder ausbleibenden Brems- bzw. Beschleunigungsmanövern ab. Die größten Spannweiten finden sich für die stärksten Eingriffe in die Längsführung ($M_{II} = 1.59\text{m/s}^2$, $SD = 0.70$, $p_{I-II} < .001$, $p_{0-II} < .001$).

Tabelle 20: Ergebnisse der Zwischensubjekttests der Spannweite der Gierrate für die einfache Geradeausfahrt ($df = 1$; Fehler $df = 365$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Längseingriffs	-	-	156.38	<.001
Richtung des Längseingriffs	-	-	12.09	.001
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	62.80	<.001

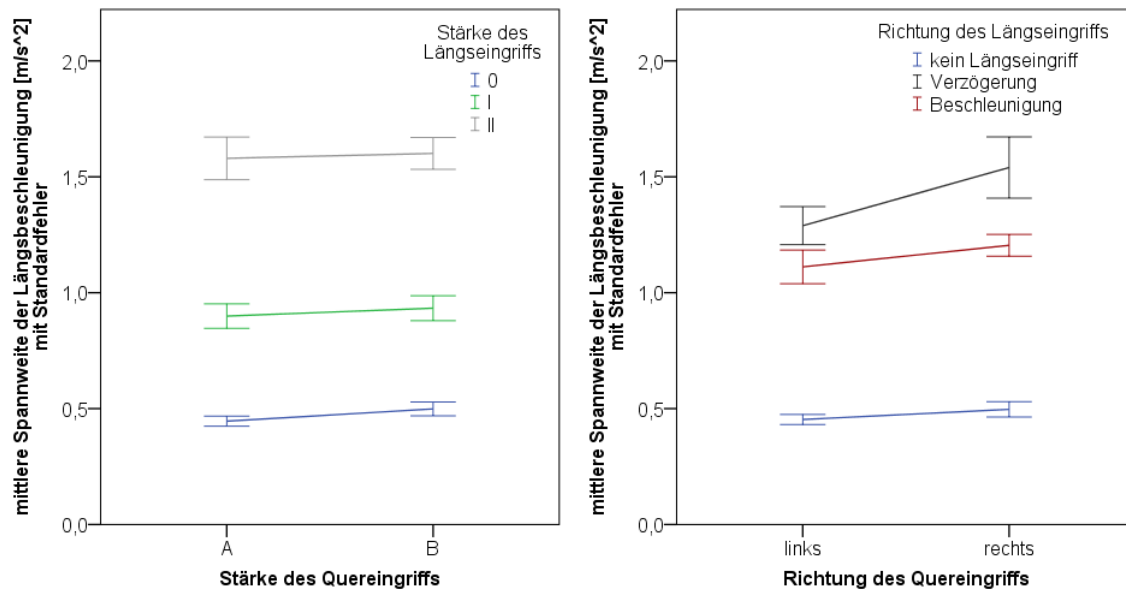


Abbildung 26a und b: Darstellung der Längsbeschleunigungsspannweiten in Abhängigkeit der Eingriffsintensitäten (Abbildung 26a, links) und der Eingriffsrichtungen (Abbildung 26b, rechts).

Die Analyse der Auswirkung in Abhängigkeit der Eingriffsrichtungen zeigt erneut die Dominanz der longitudinalen Komponente für dieses Maß (Abbildung 26b). Verzögerungen gehen, unabhängig davon, ob Lenkeingriffe nach rechts oder links ausgegeben werden, mit größeren Veränderungen in der

Längsbeschleunigung einher als es Beschleunigungsmanöver bewirken. Im Mittel liegen die auftretenden Spannweiten nach Verzögerungen bei 1.48 m/s^2 ($SD = 0.82$) und damit geringfügig über den mittleren Werten nach Beschleunigungen ($M_{\text{Besch}} = 1.18 \text{ m/s}^2$, $SD = 1.19$, $p_{\text{Verz-Besch}} > .001$).

Die Wechselwirkung von Stärke und Richtung innerhalb der Längskomponente (siehe Anhang) unterstreicht darüber hinaus die Bedeutung stärkerer Verzögerungen (Intensität „II“). Verglichen mit schwächeren Eingriffen (Intensität „I“) liegen sowohl für Verzögerungen als auch für Beschleunigungen deutlich stärkere Veränderungen der Fahrzeugreaktionen vor. Dies gilt besonders für Verzögerungen mit hoher Intensität. Die hier auftretenden Spannweiten setzen sich deutlich von denen der Beschleunigung ab ($M_{\text{VerzII}} = 2.08 \text{ m/s}^2$, $SD = 0.63$, $M_{\text{BeschII}} = 1.31$, $SD = 0.58$, $p_{\text{VerzII-BeschII}} < .001$). Die größeren Spannweiten bei Verzögerungen sind damit primär auf Eingriffe mit hoher Intensität zurückzuführen.

Das primär longitudinale Veränderungsmaß der Längsbeschleunigung betont im Wesentlichen die Rolle stärkere Längseingriffe, insbesondere die von Verzögerungen. Die unter subjektiven Gesichtspunkten identifizierten Besonderheiten, wie z. B. die größeren Auswirkungen eindimensionaler Lenkeingriffe, schlagen sich überhaupt nicht nieder. Effekte der Querführung können nicht nachvollzogen werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Längsbeschleunigung der Geradeausfahrt:

- Die Spannweite der Längsbeschleunigung wird ausschließlich von Eigenschaften der Längsführung beeinflusst. Weder Intensität noch Richtung der Quereingriffe führen zu Veränderungen in der longitudinalen Fahrzeugreaktion.
- Die größten Veränderungen zeigen sich mit den intensivsten Eingriffen und insbesondere für Verzögerungen.
- Auffällige Eingriffsmuster, wie alleinige Lenkungseingriffe oder Beschleunigungen mit Lenkeingriffen nach rechts, finden keine direkten Entsprechungen in der Spannweite der Längsbeschleunigung.
- Aufgrund der fehlenden Abhängigkeiten zwischen den Auswirkungen beider Eingriffsdimensionen kann kein direkter Bezug zwischen der subjektiven Wahrnehmung und den Veränderungen, denen die Längsbeschleunigung unterliegt, festgestellt werden.

5.2.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Geradeausfahrt

Unter inhaltlichen Gesichtspunkten kann für alle untersuchten Eingriffsbilder eine gute Beherrschbarkeit festgestellt werden. Als Schlüsselgröße der Beherrschbarkeit überschreiten die mittleren Störungsbewertungen nicht den Bereich der „Störung des Fahrens“. Zudem kann der Großteil der mittleren Bewertungen im unteren Bereich dieser Kategorie verortet werden (Bewertungen < 4.5). Die subjektive Wahrnehmung aller Eingriffe liegt damit weit unterhalb eines kritischen Niveaus. Ebenso deuten die absoluten Werte der Verhaltensmaße bzw. die fahrdynamischen Maße nicht auf eine problematische Fahrer-Fahrzeug-Reaktion hin, wenngleich keine Absicherung über Grenzwerte vorgenommen wird.

Innerhalb dieses unkritischen Spektrums können Beschleunigungen mit gleichzeitigen Lenkeingriffen nach rechts als besonders relevant bewertet werden. Eingriffe dieser Art werden im Vergleich zu anderen Kombinationen als beanspruchender erlebt. Ebenso fallen Lenkeingriffe auf, die ohne weitere longitudinale Komponente dargeboten werden. Eingriffe dieser Art (eindimensionale Lenkungseingriffe) können größere Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion haben als zweidimensionale Kombinationen. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine hohe Darbietungsintensität. Werden diese Auswirkungen mit stärkeren und nicht mit schwächeren Kombinationen verglichen, zeigen sich keine Unterschiede mehr. Die Verhaltensmaße stützen diese Beobachtung weitgehend. Für alleinige Lenkeingriffe können die größten maximalen Lenkradwinkel und damit die größten zugelassenen Auslenkungen infolge der Eingriffskombinationen festgestellt werden. Insbesondere für Lenkeingriffe nach rechts treten erhöhte Werte auf, die jedoch durch die lenkradbezogenen Reaktionszeiten relativiert werden. Der mittlere Zeitpunkt der maximalen Auslenkung und damit der Zeitpunkt, zu dem der Lenkausschlag durch den Fahrer begrenzt wird, liegt für alle Eingriffe zwischen 600 und 400 ms. Für die besonders relevanten Eingriffsbilder mit Querkomponenten nach rechts kann zudem eine signifikante Verbesserung der Reaktionen gegenüber weniger beanspruchenden Eingriffen festgestellt werden. Die Ergebnisse zur Spannweite der Gierrate fügen sich in dieses Bild, da insbesondere für Lenkeingriffe nach rechts erhöhte Werte auftreten. Die Spannweite der Längsbeschleunigung fällt als einziges Maß aus diesem Mustern. Da dieser Kennwert allein von Faktoren der Längsführung beeinflusst wird, zeigen sich keine Auffälligkeiten, die die bisherigen Analysen der relevanten Eingriffsbilder widerspiegeln.

Insgesamt zeigt sich für die Wahrnehmungs- und Verhaltensmaße der Geradeausfahrt ein komplexes Wirkmuster mit vielseitigen Abhängigkeiten. Für die subjektive Beherrschbarkeit und das Lenkverhalten können übergreifende Interaktionen festgestellt werden (siehe Tabelle 21), die das Zusammenspiel der Eingriffsrichtungen von Quer- und Längskomponenten betreffen. Unter methodischen Gesichtspunkten kann davon ausgegangen werden, dass eine umfassende Bewertung von kombinierten Eingriffen innerhalb einer Geradeausfahrt nicht durch eine unabhängige Betrachtung beider Dimensionen (getrennte Analyse von Quer- und Längseingriffen) erfolgen sollte. Die Ausprägung von Schlüsselgrößen, wie der subjektiven Wahrnehmung und der Lenkreaktion infolge der Eingriffe, können nicht durch bloße additive Verknüpfungen einzelner Bewertungen vorhergesagt werden.

Tabelle 21: Zusammenfassung der vorliegenden Wechselwirkungen für die untersuchten Maße innerhalb der Geradeausfahrt. Eine übergreifende Interaktion („Z“) zwischen den Komponenten (Quer- und Längseingriff) liegt dann vor, wenn für mindestens eine Eigenschaft einer Komponente (Intensität und/oder Richtung) eine Interaktion mit einer Eigenschaft der jeweils anderen Komponente nachgewiesen werden kann. Eine Interaktion innerhalb einer Komponente liegt vor, wenn eine signifikante Wechselwirkung zwischen Intensität und Richtung innerhalb der Quer- oder Längseingriffe auftritt. Die erhobenen Maße sind spaltenweise abgetragen, zwischen den Arten der Interaktion wird zeilenweise unterschieden.

	Störungs- bewertungen	maximaler Lenkrad-winkel	Zeitpunkt des maximalen Lenkrad- winkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbe- schleunigung
Übergreifende Interaktion zwischen den Eingriffs- komponenten („Z“)	Richtung (Typ 2)	Richtung (Typ 2)	-	-	-
Interaktion von Stärke und Richtung innerhalb der Komponenten	Längseingriff	Quereingriff	-	Quereingriff	Längseingriff

Zudem treten in nahezu allen Maßen wechselseitige Einflüsse zwischen der Richtung und Stärke der Komponenten auf (vgl. Tabelle 21). Die unterschiedlichen Auswirkungen von Lenkeingriffen nach rechts und links entsprechen nicht den Erwartungen an das Prüfszenario einer einfachen Geradeausfahrt. Obwohl nur geringe Unterschiede zwischen den Richtungen auftreten, finden sich die Richtungsabhängigkeiten in der Mehrzahl der Maße. Eine mögliche Erklärung für die erhöhten Störungsbewertungen kann in der Prüfsituation liegen. Während zur rechten Seite ca. 3 m Abstand zur Fahrbahnbegrenzung bestanden, wurde das Fahrscenario zur linken Seite durch keinerlei bauliche Strukturen begrenzt (vgl. Abbildung 21a). Da sich diese Besonderheit der Prüfsituation nur auf die Wahrnehmung der Probanden auswirken sollte, bleibt die Erklärung für Richtungsabhängigkeiten in den Verhaltensmaßen zunächst offen.

Obwohl die Ursachen für die unerwarteten Richtungsabhängigkeiten innerhalb einer Geradeausfahrt nicht geklärt werden können, scheint die systematische Variation von Intensität und Richtung der Komponenten dennoch angebracht, um weitere Abhängigkeiten aufzudecken. Für die Längs- und Querkomponenten der Eingriffe können unterschiedliche Trends im Zusammenspiel von Stärke und Richtung festgestellt werden. Im Bereich der lateralen Komponente setzen sich stärkere Eingriffe deutlich von schwächeren Manipulationen ab. Zudem treten mit stärkeren Lenkungseingriffen die Unterschiede zwischen den Eingriffsrichtungen deutlich zu Tage. Der maximale Lenkradwinkel und die resultierende Gierrate sind bei Lenkeingriffen nach rechts erkennbar erhöht.

Für die longitudinale Komponente zeigt sich eher ein entgegengesetzter Trend. Mit steigender Intensität nivellieren sich die Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffsrichtungen. Schwächere Beschleunigungen werden geringfügig beanspruchender erlebt als schwächere Verzögerungen. Werden jedoch stärkere Verzögerungen und Beschleunigungen dargeboten, können in den Störungsbewertungen keine

Unterschiede mehr festgestellt werden. Beide Eingriffe in die Längsführung werden von Fahrern scheinbar als gleichermaßen beanspruchend erlebt, wenngleich die statistische Testlogik Aussagen dieser Art nicht gestattet. Vor dem Hintergrund der Längsbeschleunigung bzw. deren Spannweite ist dies ein unerwarteter Befund. Werden Verzögerungen dargeboten, treten im Vergleich zu Beschleunigungen deutlich erhöhte Spannweiten auf. Das Konzept der resultierenden Fahrzeugreaktion als eigentliche Determinante des subjektiven Erlebens sieht für diesen Fall deutliche Unterschiede in den Störungsbewertungen vor. Inwieweit sich diese Erkenntnisse zur querführenden Assistenz auf Bewertungsansätze für kombinierte Eingriffe übertragen lassen, wird daher im Folgenden diskutiert.

5.2.1.2 Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen in der Geradeausfahrt

Zwischen den subjektiven Wahrnehmungen der Probanden und den verhaltensbezogenen Maßen gelingt kein eindeutiger Bezug. Zwar zeigen sich insbesondere für die Darstellungen der Eingriffsintensitäten verschiedene Parallelen, die jedoch auf Einzelaspekte beschränkt bleiben. Drei der vier möglichen übergreifenden Interaktionen treten in keinem der Maße auf (Typ 1, 3 und 4). Eine Gegenüberstellung der wirkenden Faktoren und deren Wechselwirkungen (siehe Tabelle 22) zeigt, dass die einzelnen Maße zum Teil sehr unterschiedlichen Auswirkungen unterliegen. Verflechtungen zwischen den Dimensionen in Form von übergreifenden Interaktionen gehen ausschließlich auf Einflüsse der Richtungen zurück. Da die Mehrzahl der Verhaltensmaße und die Wahrnehmung der Fahrer nicht von identischen Faktoren beeinflusst werden, kann nicht von einer engen Beziehung beider Größen ausgegangen werden. Obwohl sich damit insgesamt ein eher heterogenes Bild der Wirkfaktoren abzeichnet, fallen die Parallelen zwischen subjektiv wahrgenommener Störung und den daraus resultierenden Fahrzeugreaktionen auf. Von fünf möglichen Übereinstimmungen zeigen sich für die Spannweite der Gierrate drei gemeinsame Interaktionen mit den Störungsbewertungen. Für die Spannweite der Längsbeschleunigung treten vier Parallelen auf. Die lenkungsbezogenen Maße zeigen für diesen Vergleich mit jeweils einer Übereinstimmung deutlich geringere Parallelen.

Tabelle 22: Darstellung der abhängigen Variablen und der Wirkfaktoren einschließlich der möglichen Wechselwirkungen für die Geradeausfahrt. Signifikante Haupteffekte und Interaktionen sind durch „x“ gekennzeichnet. Die Spalte „Art des Effekts“ unterscheidet Haupteffekte (H), Wechselwirkungen innerhalb einer Eingriffskomponente (I) und übergreifende Wechselwirkungen zwischen den Komponenten (Z). Je mehr Kreuze in einer Zeile auftreten, desto homogener wirken die Faktoren in allen Maßen. Die subjektiven Störungsbewertungen und Verhaltensmaße unterliegen einem eher heterogenen Bild von Wirkfaktoren.

Faktor / Faktoren- kombination	Art des Effekts	Störungs- bewertungen	Maximaler Lenkrad- winkel	Zeitpunkt des max. Lenkrad- winkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längs- beschleunigung
Stärke des Längseingriffs	H	x			x	x
Stärke des Quereingriffs	H	x			x	x
Richtung des Quereingriffs	H	x		x	x	x
Richtung des Längseingriffs	H					
Stärke des Längseingriffs * Stärke des Quereingriffs	Z (Typ 1)					
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Quereingriffs	Z (Typ 4)					
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	x				x
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I		x		x	
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z (Typ 3)					

Da gemeinsame Einflussfaktoren noch keine Schlüsse über den inhaltlichen Zusammenhang der Variablen liefern, kann deren korrelative Beziehung untersucht werden. Um zwischen ein- und zweidimensionalen Eingriffen differenzieren zu können, werden die Berechnungen für beide Eingriffsarten getrennt vorgenommen. Hierbei zeigen sich leicht abweichende Zusammenhänge zwischen den Störungsbewertungen und den übrigen Maßen (siehe Tabelle 23) für ein- und zweidimensionale Eingriffe.

Tabelle 23: Korrelative Zusammenhänge zwischen den subjektiven Störungsbewertungen und den erhobenen Verhaltensmaßen sowie den Veränderungsmaßen der resultierenden Fahrzeugreaktion. Die Angabe der Korrelation erfolgt getrennt für alleinige Lenkeingriffe und vollständige Eingriffskombinationen.

		Störungsbewertungen für alleinige Lenkeingriffe	Störungsbewertungen für kombinierte Eingriffe
Maximaler Lenkradwinkel	Korrelation	.303*	.167**
	Signifikanz	.010	.003
	N	71	326
Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels	Korrelation	-.076	-.060
	Signifikanz	.527	.281
	N	72	328
Spannweite der Gierrate	Korrelation	.438**	.443**
	Signifikanz	.000	.000
	N	72	328
Spannweite der Längsbeschleunigung	Korrelation	.215	.402**
	Signifikanz	.070	.000
	N	72	328

Die Bewertungen der Lenkeingriffe weisen geringe Zusammenhänge zu den maximalen Lenkradwinkeln und mittlere Zusammenhänge zu der Spannweite der Gierrate auf. Treten infolge der Lenkeingriffe höhere Auslenkungen und größere Spannweiten der Gierrate auf, bewerten Fahrer die Beeinträchtigung eher höher. Kausale Zusammenhänge dürfen hier jedoch nicht angenommen werden. Neben dem Kennwert der Gierrate und dem maximalen Lenkradwinkel können keine bedeutsamen Korrelationen zu den Subjektivurteilen festgestellt werden. Weitere Parallelen zwischen Probandenurteilen und Verhaltensmaßen treten somit nicht auf.

Wenngleich diese Befunde den Ergebnissen anderer Untersuchungen zu Lenkeingriffen entsprechen (z. B. Schmidt, 2009), fallen die Korrelationen für die Spannweite der Gierrate deutlich geringer als erwartet aus ($r = .438$). Als Ursache für diese relativ schwache Beziehung kommt eine geringere Bandbreite der dargebotenen Eingriffe in Frage. Die Maxima der mittleren Störungsbewertung vergleichbarer Untersuchungsansätze (vgl. Kapitel 2.6.3.3) lassen darauf schließen, dass im Vergleich zur vorliegenden Studie stärkere Lenkmomente verwendet wurden. Darüber hinaus wurde eine deutlich höhere Anzahl von Eingriffen in die Berechnung einbezogen (zwischen 480 und 2362 Datensätze). Da mit einer größeren Anzahl und intensiveren Lenkeingriffen ein breiteres Wahrnehmungsspektrum abgedeckt wird, können Zusammenhänge besser abgebildet werden.

Als wichtigste Ursache für die deutlich abweichenden Beziehungen zwischen den subjektiven und objektiven Auswirkungen der Eingriffe kann jedoch der Analyseansatz betrachtet werden. In vergleichbaren Arbeiten werden die Subjektivurteile zunächst über post-hoc Kategorien der resultierenden Fahrzeugreaktion gemittelt. Hierfür werden mehrere Fahrzeugreaktionen (z. B. alle Reaktionen mit einer Gierrate zwischen $1^\circ/\text{s}$ und $1,5^\circ/\text{s}$) in einer Kategorie zusammengefasst und deren mittlere subjektive Bewertung berechnet. Diese Mittelwerte bilden dann den Ausgangspunkt der Korrelation und liefern erfahrungsgemäß bessere Zusammenhänge zwischen beiden Größen. Ein vergleichbares Vorgehen wird in Kapitel 6 beschrieben. Die hier berechneten Beziehungen sollen

zunächst als Ausgangspunkt für spätere Vergleiche dienen und zudem einen ersten Vergleich zwischen den Zusammenhängen von alleinigen Lenkeingriffen und kompletten Eingriffskombinationen liefern.

Liegen vollständige Eingriffskombinationen vor, ändert sich das oben beschriebene Ergebnismuster. Der sehr geringe Zusammenhang zwischen den Störungsbewertungen und den maximalen Lenkradwinkeln ($r = .167$) kann für diese Eingriffsart, trotz hochsignifikanter Testung, vollständig vernachlässigt werden. Sind Fahrer kombinierten Eingriffen ausgesetzt, entsprechen deren Störungsbewertungen noch weniger den zugelassenen Auslenkungen als es für alleinige Lenkeingriffe der Fall ist. Die Korrelation der Gierraten-Spannweite bleibt im Vergleich zu den eindimensionalen Eingriffen auf vergleichbarem Niveau ($r = .443$). Auch hier tritt ein mittlerer Zusammenhang zwischen beiden Maßen auf. Außerdem finden sich Gemeinsamkeiten zwischen der subjektiven Beanspruchung und der Spannweite der Längsbeschleunigung, die mit den Eingriffen in die Fahrzeugführung auftritt. Auch dieser Zusammenhang erreicht ein signifikantes Niveau, wenngleich von einer mittleren Stärke ausgegangen werden muss ($r = .402$).

Die Urteile der Probanden weisen damit vergleichbar starke Parallelen zu Fahrzeugreaktionen der Quer- und Längsführung auf. Als potentielle Führungsgröße der subjektiven Beherrschbarkeit von kombinierten Eingriffen in die Fahrzeugführung kommen damit ebenfalls Maße der Längsbeschleunigung in Frage. Die Rollen und das Verhältnis von Gierrate und Längsbeschleunigung für die Wahrnehmung der Störung werden in Kapitel 6 diskutiert.

5.2.2 Auswirkungen in der Kurvenfahrt

Die Störungsbewertungen liegen auch für das Kurvenszenario³ in einem sehr niedrigen Bereich, ohne dass ein kritisches Niveau erreicht wird. Für keine der beiden Aufschlüsselungen gehen die mittleren Bewertungen über die Urteilkategorie „Störung des Fahrens“ hinaus. Die Intensitäten von Quer- und Längskomponenten wirken dabei unabhängig voneinander auf die subjektive Wahrnehmung (Tabelle 24, Abbildung 27a). Stärkere Quereingriffe wirken störender als schwächere Eingriffe. Intensivere Eingriffe in die Längsführung gehen eher mit größeren subjektiven Auswirkungen einher, obwohl sich hier ein unerwarteter Effekt zeigt. Die Bewertungen alleiniger Lenkeingriffe ($M_0 = 3.25$, $SD = 1.90$) unterscheiden sich nicht von den Bewertungen schwächerer, aber vollständiger Kombinationen ($M_1 = 3.21$, $SD = 1.72$, $p_{0-1} = .87$). Das Auftreten von Kombinationen führt damit nicht zwangsläufig zu höheren Störungsbewertungen. Vielmehr scheint die Bedeutung der longitudinalen Intensität mit stärkeren Eingriffen in die Querführung abzunehmen. Nur wenn schwächere Lenkeingriffe vorliegen, werden unterschiedlich starke Brems- oder Beschleunigungsmanöver auch entsprechend wahrgenommen und bewertet.

³ Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse waren zum Teil Gegenstand einer Veröffentlichung im Begleitband der 28. VDI/VW-Gemeinschaftstagung „Fahrerassistenzsysteme und Integrierte Sicherheit“ (Kleen und Vollrath, 2012).

Tabelle 24: Ergebnisse der Zwischensubjekttests der Störungsbewertungen für die Kurvenfahrt (df = 1; Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	37.08	<.001
Stärke des Längseingriffs	-	-	28.02	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	14.66	<.001
Richtung des Längseingriffs	-	-	28.83	<.001
Richtung des Quereingriffs *				
Richtung des Längseingriffs	Z	2	4.31	.039

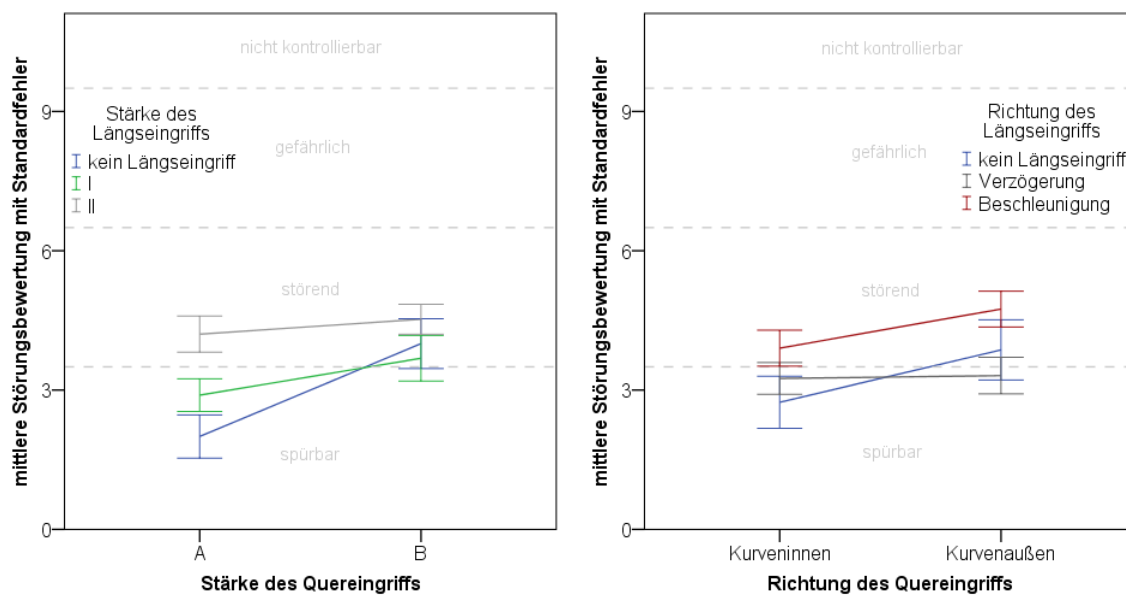


Abbildung 27a und b: Dargestellt sind die mittleren Störungsbewertungen der Kurvenfahrt für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 27a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 27b).

Für die Eingriffsrichtungen zeigt sich eine Wechselwirkung zwischen beiden Dimensionen (Interaktion des Typs „2“). Treten mit Lenkeingriffen gleichzeitig Beschleunigungen auf, zeigen sich die höchsten Störungsbewertungen (siehe Abbildung 27b). Eingriffe zum Kurvenäußeren ($M_{\text{BeschAu}} = 4.01$, $SD = 1.72$) wirken dabei störender als Eingriffe zum Inneren der Kurve ($M_{\text{BeschIn}} = 3.38$, $SD = 1.67$; $p_{\text{BeschAu-BeschIn}} < .001$). Werden hingegen Verzögerungen eingesetzt, kann die Richtung der Lenkeingriffe vernachlässigt werden. Es zeigen sich keine Richtungsabhängigkeiten. Die niedrigsten Störungsbewertungen treten mit alleinigen Lenkeingriffen zum Kurveninneren auf ($M_{\text{In}} = 2.90$, $SD = 1.87$). Lenkeingriffe zum Kurvenäußeren wirken demgegenüber nicht störender ($p_{\text{In-Au}} = .211$), setzen sich aber tendenziell von Kombinationen mit Verzögerungen ab ($p_{\text{In-VerzAu}} = .090$).

Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Störungsbewertungen des Kurvenszenarios:

- Die Störungsbewertungen der Kurvenfahrt liegen, wie die der Geradeausfahrt, in einem niedrigen Bereich („Störung des Fahrens“).
- Die Intensitäten beider Eingriffsdimensionen wirken unabhängig voneinander auf die Wahrnehmung der Eingriffsbilder.
- Stärkere Eingriffe in die Querführung wirken, ebenso wie intensivere Manipulationen der Längsführung, störender als schwächere Varianten.
- Allein das Vorliegen von kombinierten Eingriffen führt noch nicht zu einer stärkeren subjektiven Beeinträchtigung. Mit stärkeren Eingriffen in die Querführung scheint die Bedeutung der longitudinalen Komponenten zu sinken, sodass auch alleinige Lenkeingriffe einen höheren Skalenwert erreichen können.
- Die Eingriffsrichtungen beider Dimensionen wirken wechselseitig auf die Störungsbewertungen: Eingriffe zum Kurvenäußeren, insbesondere mit gleichzeitigen Beschleunigungen, setzen sich ab. Verzögerungen nivellieren die Auswirkungen der lateralen Richtung.

Maximaler Lenkradwinkel

Anhand des Lenkverhaltens können die subjektiven Bewertungen der Probanden nur in Teilen nachvollzogen werden. Die verschiedenen Faktoren werden auch durch andere Haupteffekte und in einer weiteren Interaktion innerhalb der lateralen Komponente wirksam (siehe Tabelle 25). Die Analyse der Intensitäten (siehe Abbildung 28a) zeigt, dass stärkere Quereingriffe insgesamt mit geringfügig erhöhten maximalen Lenkradwinkeln einhergehen ($p_{A-B} = .005$). Anhand der Wechselwirkung innerhalb der lateralen Komponenten kann allerdings eine Einschränkung vorgenommen werden. Nur wenn Lenkeingriffe zum Inneren der Kurve vorgenommen werden, lassen Fahrer größere Auslenkungen zu (siehe Anhang). Auf potentiell störendere Eingriffskomponenten (stärkere Lenkeingriffe zum Kurvenäußeren) reagieren Fahrer mit verbesserten Lenkreaktionen. Die Stärke mit der gleichzeitig gebremst oder beschleunigt wird, spielt hierbei keine Rolle. Wie für die Störungsbewertungen zeigt sich damit die Dominanz der lateralen Intensität für die maximal zugelassene Auslenkung infolge der Eingriffsbilder. Da es sich bei dem maximalen Lenkradwinkel jedoch um ein primär laterales Verhaltensmaß handelt, wären ausbleibende Effekte der Längsführung nicht überraschend. Wie im Folgenden beschrieben wird, lassen sich dennoch Einflüsse der longitudinalen Komponente im Bereich des Lenkverhaltens zeigen.

Tabelle 25: Ergebnisse der Zwischensubjekttests der maximalen Lenkradwinkel für die Kurvenfahrt (df = 1; Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	7.31	.007
Richtung des Quereingriffs	-	-	9.49	.002
Richtung des Längseingriffs	-	-	78.04	.000
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I	-	39.19	.000
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	12.21	.001

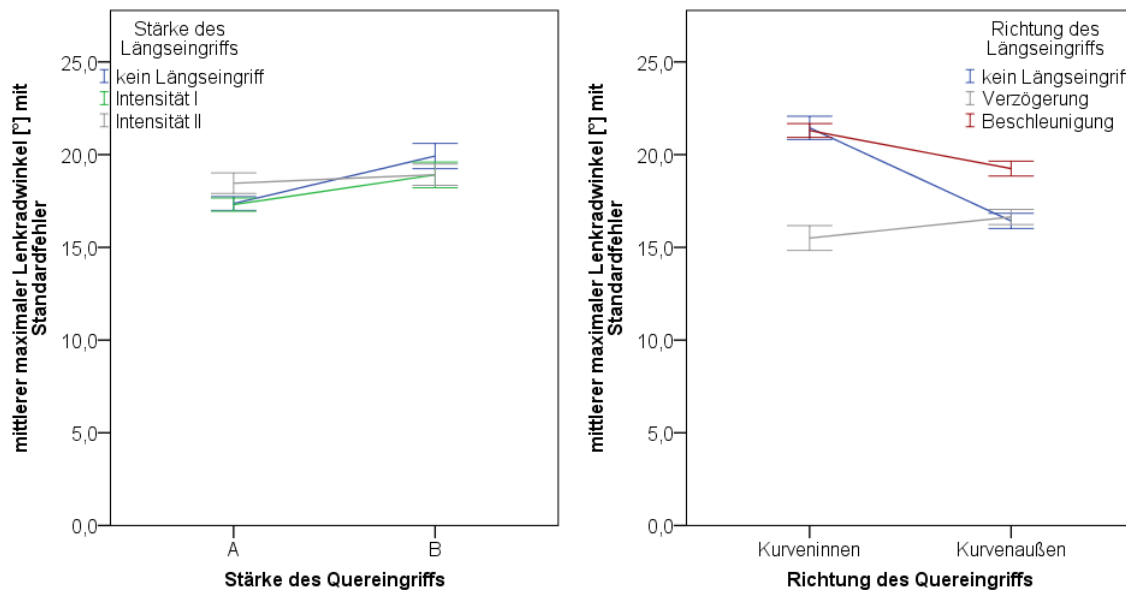


Abbildung 28: Darstellung der mittleren maximalen Auslenkungen [°] des Kurvenszenarios für die Intensitäten beider Eingriffsdimensionen (Abbildung 28a, links) und deren Richtungen (Abbildung 28b, rechts).

Die Eingriffsrichtungen beider Komponenten (siehe Abbildung 28b) wirken, analog zu den subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen, wechselseitig auf den maximalen Lenkradwinkel. Liegen Lenkeingriffe zum Kurveninneren vor, zeigen sich für Kombinationen mit gleichzeitiger Beschleunigung und für alleinige Lenkeingriffe keine Unterschiede in den maximalen Auslenkungen ($p_{\text{BeschIn-In}} = .839$). Wird das Fahrzeug gleichzeitig abgebremst, treten aber deutlich geringere Auslenkungen auf ($M_{\text{VerzIn}} = 15.49^\circ$, SD = 6.20). Weisen die Lenkeingriffe hingegen zum Äußeren der Kurve, reagieren Fahrer anders. Obwohl alleinige Lenkeingriffe dieser Richtung als unangenehmer erlebt werden, zeigen sich im Vergleich zur Gegenrichtung wesentlich geringere Auswirkungen auf das Lenkverhalten ($p_{\text{In-Au}} < .001$). Störendere Lenkeingriffe werden offenbar durch kompensatorische Handlungen besser kontrolliert.

Das Eingriffsbild mit den höchsten Störungsbewertungen (Beschleunigung und Lenkeingriffe zum Kurvenäußeren) führt im Vergleich zu den gut kontrollierten eindimensionalen Lenkeingriffen zu größeren Auswirkungen. Auch hier lassen sich kompensatorische Reaktionen zeigen. Die Auslenkungen, die hierbei auftreten, erreichen nicht das Niveau der weniger kritisch bewerteten Kombination der

Gegenrichtung („Beschleunigung-Kurveninnen“). Die Kombination „Beschleunigung-Kurvenaußen“ wirkt damit störender, wird jedoch besser kontrolliert als angenehmere Eingriffsbilder ($p_{\text{In-BeschAu}} = .004$). Treten Verzögerungen auf, zeigen sich keine Unterschiede in Abhängigkeit von der Richtung. Die zugelassenen Auslenkungen sind gleichermaßen gering ($p_{\text{VerzIn-VerzAu}} = .148$).

Zusammenfassung der Ergebnisse zum maximalen Lenkradwinkel des Kurvenszenarios:

- Die maximal zugelassenen Auswirkungen unterliegen wie die Störungsbewertungen einer übergreifenden Interaktion (Typ „2“) zwischen den Richtungen beider Dimensionen. Das Wirkmuster der Faktoren unterscheidet sich zudem von dem der subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen.
- Liegen Eingriffe zum Kurveninneren vor, werden mit stärkeren lateralen Eingriffen größere Auslenkungen zugelassen. Für die potentiell störenderen Eingriffe zum Kurvenäußeren spielt eine höhere Intensität keine Rolle. Hier kann eine verbesserte Kontrolle festgestellt werden.
- Die Intensität der Längseingriffe übt innerhalb des Kurvenszenarios keinen Einfluss auf das Ausmaß der zugelassenen Auslenkung aus. Allerdings zeigt die Richtung, mit der in die Längsführung eingegriffen wird, in Verbindung mit der lateralen Eingriffsrichtung, Auswirkungen auf das Lenkverhalten.
- Lenkeingriffe zum Kurveninneren gehen in Kombination mit Beschleunigungen und als alleinige laterale Eingriffe mit den größten Auslenkungen einher. Lenkt das Fahrzeug zum Kurvenäußeren, verringern sich die zugelassenen Auslenkungen für diese beiden Eingriffsbilder. Die Kombination „Kurvenaußen-Beschleunigung“ wird im Vergleich zu ausschließlichen Lenkeingriffen etwas schlechter begrenzt.
- Die subjektiv beeinträchtigende Kombination „Kurvenaußen-Beschleunigung“ wird damit zwar als unangenehmer erlebt, aber im Vergleich zu anderen Eingriffen besser kontrolliert.
- Liegen Verzögerungen an, treten insgesamt nur geringe Auslenkungen auf, die nicht von der Richtung der Lenkeingriffe beeinflusst werden.
- Anhand des maximalen Lenkradwinkels lassen sich nicht nur die bloßen Auswirkungen der Eingriffe beobachten, sondern gleichermaßen kompensatorische Fahrerreaktionen in Folge störender Kombinationen.

Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels

Die Analyse der lenkradbezogenen Reaktionszeiten des Kurvenszenarios zeigt sehr differenzierte Fahrerreaktionen für die verschiedenen Eingriffsbilder. Der Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels variiert stark in Abhängigkeit der einzelnen Faktoren und deren Zusammenspiel (siehe Tabelle 26). Da Dreifach-Interaktionen auftreten (Typ „5“), erfolgt die Analyse anhand differenzierter Darstellungen und nicht anhand der bisher verwendeten Diagrammtypen.

Tabelle 26: Ergebnisse der Zwischensubjekttests des Zeitpunkts der maximalen Auslenkung für die Kurvenfahrt (df = 1; Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Längseingriffs	-	-	15.13	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	58.14	<.001
Richtung des Längseingriffs	-	-	49.29	<.001
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	17.04	<.001
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I	-	13.68	<.001
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	3	14.26	<.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	39.59	<.001
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	5	13.28	<.001
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	6	19.61	<.001

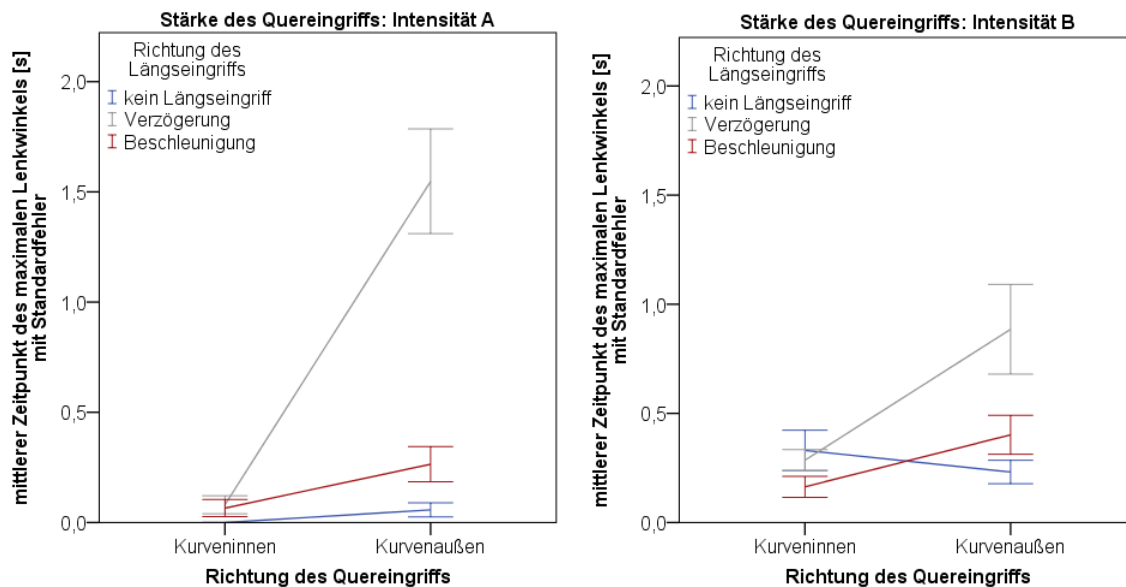


Abbildung 29a und b: Darstellung der lenkradbezogenen Reaktionszeiten, aufgeschlüsselt anhand der Eingriffsrichtungen. Abbildung 29a (links) zeigt die Zeitpunkte des maximalen Lenkwinkels bei schwächeren lateralen Eingriffen (Intensität A). Abbildung 29b zeigt die Zeitpunkte für stärkere Eingriffe (Intensität B).

Treten Kombinationen mit schwächeren lateralen Eingriffen auf (Intensität A, Abbildung 29a), zeigen sich mit Lenkeingriffen zum Kurveninneren, unabhängig von der longitudinalen Komponente, sehr schnelle Reaktionen ($M_{\text{IntA:BeschlIn}} = 0.07\text{s}$, $SD = 0.23$). Die als etwas störender bewerteten Eingriffsbilder mit Beschleunigungskomponente werden nicht später begrenzt als Kombinationen mit Verzögerungen ($p_{\text{IntA:BeschlIn-VerzIn}} = .789$). Darüber hinaus zeigt sich, dass Fahrer hier zwar größere Auslenkungen zulassen, diese aber gegenüber der Gegenrichtung schneller begrenzen ($p_{\text{IntA:BeschlIn-BeschAu}} = .028$).

Werden Lenkeingriffe zum Äußeren der Kurve dargeboten, treten differenziertere Reaktionszeiten auf. Auffällig sind zunächst die sehr späten Begrenzungen bei Eingriffen mit Verzögerungen. Der schon zuvor beschriebene Effekt von Bremsingriffen scheint sich hier zu bestätigen. Die ohnehin wenig störenden Kombinationen (vgl. Abbildung 27b) gehen mit verhältnismäßig geringen maximalen Lenkradwinkeln einher (vgl. Abbildung 29b) und werden erst nach 1,55 Sekunden begrenzt. Werden Eingriffe als harmlos wahrgenommen, verlangsamen sich die Fahrerreaktionen.

Erhöhungen der Reaktionszeiten bei Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren lassen sich auch mit Beschleunigungen feststellen. Da dieses Eingriffsbild störendere Auswirkungen hat, sind verlangsamte Reaktionen hier eher ungünstig. Die Begrenzung des Lenkungsausschlag nach ca. 260 ms ($M_{\text{IntA:BeschAu}} = 0.26$ s, $SD = 0.54$) zeigt jedoch, dass hier keine bedenklichen Reaktionszeiten vorliegen. Für alleinige Lenkeingriffe lassen sich keine Unterschiede zwischen den Richtungen Kurveninnen und -außen feststellen ($p_{\text{IntA:In-Au}} = .09$).

Wird stärker in die Querführung eingegriffen (Intensität „B“, siehe Abbildung 29b) zeigen sich viele Parallelen zu den bisherigen Befunden. Die auffälligste Gemeinsamkeit bezieht sich auf die erhöhten Reaktionszeiten bei Verzögerungen und lateralen Komponenten zum Kurvenäußeren ($M_{\text{IntB:VerzAu}} = 0.89$ s, $SD = 1.00$). Da mit Verzögerungskomponenten sehr niedrige Störungsbewertungen auftreten (vgl. Abbildung 27b) und zudem nur geringe Auslenkungen zugelassen werden (vgl. Abbildung 28b), kann davon ausgegangen werden, dass Fahrer bei Eingriffen mit Bremsmanövern keine Notwendigkeit für eine schnelle Gegenreaktion sehen. Zudem fällt auf, dass der Lenkungsausschlag bei stärkeren Lenkeingriffen zwar verhältnismäßig spät begrenzt wird, die Reaktionszeiten jedoch noch deutlich unter den Geschwindigkeiten bei schwächeren lateralen Manipulationen liegen ($p_{\text{IntA:VerzAu-IntB:VerzIn}} = .04$).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass bei stärkeren Eingriffen zum Kurvenäußeren geringere Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten auftreten (vgl. Abbildung 29a und b). Dieses Muster deutet erneut auf einen bereits beschriebenen Effekt: Stärkere Quereingriffe nivellieren die Bedeutung der longitudinalen Komponente. Mit Lenkeingriffen zum Kurveninneren ist die geringe Bedeutung der longitudinalen Komponente zudem offensichtlich. Es treten keine bzw. allenfalls tendenzielle Unterschiede in den Reaktionsgeschwindigkeiten auf ($p_{\text{IntB:BeschIn-VerzIn}} = .078$, $p_{\text{IntB:BeschIn-In}} = .082$; $p_{\text{IntB:VerzIn-In}} = .635$).

Die laterale Eingriffsrichtung (Kurveninnen und Kurvenaußen) ist hingegen von stärkerer Bedeutung für die Schnelligkeit, mit der Fahrer Lenkungsausschläge begrenzen. Für schwächere und stärkere Intensitäten zeigen sich mit Verzögerungen und Beschleunigungen höhere Reaktionszeiten zum Kurvenäußeren ($p_{\text{IntB:BeschIn-BeschAu}} = .022$; $p_{\text{IntB:VerzIn-VerzAu}} = .009$). Für alleinige Lenkeingriffe lassen sich keine Unterschiede zwischen beiden Richtungen feststellen ($p_{\text{IntB:In-Au}} = .359$). Zwar finden sich für diese Eingriffsbilder auf subjektiver Ebene erhöhte Bewertungen, wenn zum Äußeren der Kurve gelenkt wird, ohne dass sich jedoch vergleichbare Unterschiede auf der Verhaltensebene feststellen lassen.

Neben den eher späteren Fahrerreaktionen bei Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren zeigt sich ein weiterer übergreifender Trend. Mit stärkeren Lenkeingriffen treten eher schnellere und damit bessere Reaktionen

auf. Die entsprechenden Vergleiche für Eingriffe zum Kurveninneren zeigen frühere maximale Lenkradwinkel für Verzögerungen ($p_{\text{IntA:VerzIn-IntB:VerzIn}} = .002$) und alleinige Lenkeingriffe ($p_{\text{IntA:In-IntB:In}} = .015$), jedoch nicht für Beschleunigungen ($p_{\text{IntA:BeschIn-IntB:BeschIn}} = .111$). Gleiches gilt für Lenkeingriffe zum Kurvenäußeren: Nur für Kombinationen mit Beschleunigungskomponente finden sich keine schnelleren Reaktionen bei stärkeren Eingriffen in die Querführung ($p_{\text{IntA:BeschIn-IntB:BeschAu}} = .254$). Werden Fahrer also in Kurvenszenarien mit Beschleunigungen konfrontiert, ist die Stärke des Lenkeingriffs zweitrangig für die Reaktionsgeschwindigkeit. Da jedoch ohnehin sehr schnell reagiert wird, muss dieser Umstand nicht als bedenklich angesehen werden. Die Ergebnisse können dahingehend interpretiert werden, dass im Unterschied zu Kombinationen mit Verzögerungen und im Unterschied zu alleinigen Lenkeingriffen lediglich keine weiteren Verbesserungen auftreten.

Auch die Stärke der Brems- und Beschleunigungsmanöver übt einen Einfluss auf die lenkradbezogene Reaktionszeit aus. Die Auswirkungen entfalten sich im Zusammenspiel der beiden Eingriffsrichtungen (siehe Tabelle 26) und werden ebenfalls für beide Abstufungen dargestellt und diskutiert (Abbildung 30a und b). Damit werden die Auswirkungen eines weiteren Charakteristikums der Längsführung bedeutsam und innerhalb eines genuin lateralen Verhaltensmaßes sichtbar.

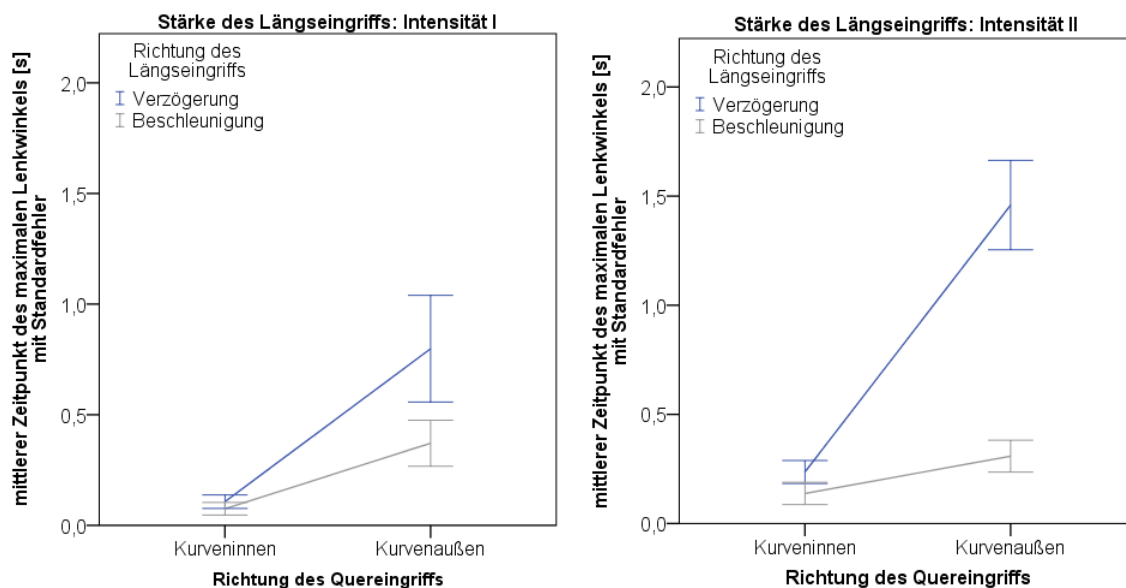


Abbildung 30: Darstellung der lenkradbezogenen Reaktionszeiten für die beiden Intensitäten der Längseingriffe und der Eingriffsrichtungen beider Dimensionen. Abbildung 30a (links) zeigt die Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels bei schwächeren longitudinalen Eingriffen (Intensität I). Abbildung 30b zeigt die Zeitpunkte für stärkere Eingriffe (Intensität II).

Treten mit Lenkungseingriffen schwächere Manipulationen der Längsführung auf (Intensität I, Abbildung 30a), zeigen sich sehr frühe maximale Lenkradwinkel in Richtung des Kurveninneren. Die lenkradbezogene Reaktionszeit liegt hier bereits bei ca. 100 ms, ohne dass sich Unterschiede für gleichzeitige Beschleunigungen und Verzögerungen feststellen lassen ($p_{\text{IntI:VerzIn-BeschIn}} = .445$). Lenkt das Fahrzeug zum Kurvenäußeren, benötigen Fahrer mehr Zeit, um die Auslenkungen zu begrenzen. Sowohl für Kombinationen mit Beschleunigungs- als auch mit Verzögerungskomponente zeigen sich signifikante Unterschiede der Mittelwerte im Vergleich zum jeweiligen Pendant ($p_{\text{IntI:VerzIn-VerzAu}} = .011$; $p_{\text{IntI:BeschIn-BeschAu}} = .009$). Obwohl mit Verzögerungen deskriptiv nochmals deutlich erhöhte Reaktionszeiten auftreten,

können keine signifikanten Differenzen gegenüber den Beschleunigungen festgestellt werden ($p_{\text{IntII:VerzAu-BeschAu}} = .117$). Diese Aufschlüsselung bestätigt die bereits in Zusammenhang mit Abbildung 29a beschriebenen Ergebnisse.

Werden stärkere Brems- oder Beschleunigungsmanöver ausgelöst (Intensität II, Abbildung 30b), zeigt sich eine weitere Facette. Mit Lenkeingriffen zum Kurveninneren zeigen sich ebenfalls keine Unterschiede in Abhängigkeit der Längsführung ($p_{\text{IntII:VerzIn-BeschIn}} = .183$). Für die lenkradbezogene Reaktionszeit spielt es demnach auch hier bei stärkeren Manipulationen der Längsführung keine Rolle, ob gebremst oder beschleunigt wird. Lenkt das Fahrzeug allerdings zum Äußeren der Kurve, ist es in dieser Situation wichtig, ob zeitgleich gebremst oder beschleunigt wird. Mit Verzögerungen begrenzen Fahrer den Lenkeingriff nochmals deutlich später, die mittlere Differenz zwischen Beschleunigungen und Verzögerungen ist sichtbar vergrößert ($p_{\text{IntII:VerzIn-VerzAu}} < .001$). Mit Beschleunigungen zeigen sich hingegen nur geringe Unterschiede zwischen Kurveninnerem und -äußeren. Die mittleren Reaktionszeiten unterscheiden sich nur marginal ($p_{\text{IntII:BeschIn-BeschAu}} < .063$) und sind für die Richtung des Kurvenäußeren um ca. 150 ms erhöht ($M_{\text{IntII:BeschIn}} = 0.14 \text{ s}$; $M_{\text{IntII:BeschAu}} = 0.31$). Die Auswirkungen stärkerer Eingriffe in die Längsführung lassen sich damit im Wesentlichen nur für Verzögerungen beobachten. Fahrer benötigen bei Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren nur dann mehr Zeit, wenn das Fahrzeug abgebremst wird.

Der Vergleich der Reaktionen zwischen den Intensitätsstufen (Intensität I und II) verdeutlicht die besondere Rolle von Verzögerungen erneut. Größere Verzögerungen gehen mit späteren Reaktionen einher, allerdings nur wenn der Lenkeingriff zum Kurvenäußeren erfolgt ($p_{\text{IntI:VerzIn-IntII:VerzAu}} = .044$). Anders als innerhalb der lateralen Komponente führen stärkere Eingriffe damit nicht zu schnelleren, sondern zu langsameren Reaktionen. Dieses Verhaltensmuster spricht ebenfalls für eine nivellierende Wirkung von Verzögerungskomponenten. Je stärker die Verzögerung dargeboten wird, desto später begrenzen Fahrer die Lenkungsausschläge. Im Bereich der Beschleunigungen treten hingegen konstant schnelle Reaktionszeiten, unabhängig der longitudinalen Komponente, auf. Weder die Vergleiche der Reaktionszeiten zwischen Kurvenaußen noch zwischen denen im Inneren weisen auf Unterschiede hin ($p_{\text{IntI:BeschIn-IntII:BeschIn}} = .311$; $p_{\text{IntI:BeschAu-IntII:BeschAu}} = .611$).

Zusammenfassung der Ergebnisse zum Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels des Kurvenszenarios:

- Der Zeitpunkt, zu dem die maximalen Auslenkungen auftreten, variiert stark mit den verschiedenen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen. Auch die lenkradbezogene Reaktionszeit als primär laterales Verhaltensmaß wird von Eingriffen in die Längsführung beeinflusst.
- Liegen Verzögerungen als Teil der Eingriffskombinationen vor, begrenzen Fahrer die Lenkungseingriffe später. Dies gilt insbesondere für die Kombination „Verzögerung-Kurvenaußen“, wenn a) schwächere laterale Eingriffe oder b) stärkere Verzögerungen vorliegen. Die wenig störenden und mit geringen Auslenkungen versehenen Eingriffsbilder gehen mit verlangsamten Reaktionen einher. Wird das Fahrzeug nur schwach abgebremst oder liegen

stärkere Eingriffe in die Querführung vor, passen Fahrer ihre Reaktionsgeschwindigkeit an und reagieren schneller.

- Die Reaktionszeiten, die mit Beschleunigungen auftreten, lassen sich nicht von den Reaktionen der übrigen Eingriffsbilder unterscheiden, sofern die Lenkungseingriffe zum Inneren der Kurve erfolgen. Dies gilt sowohl für schwächere und stärkere Beschleunigungsintensitäten als auch in Kombination mit stärkeren oder schwächeren Lenkungseingriffen.
- Mit steigender lateraler Intensität verringert sich die Bedeutung der longitudinalen Eingriffsrichtung für die Geschwindigkeit, mit der Fahrer Lenkeingriffe begrenzen.
- Beschleunigungen in Kombination mit Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren werden unabhängig der lateralen Intensität später begrenzt als in Kombination mit Eingriffen zum Inneren der Kurve. Die Stärke der Beschleunigung selbst ist hierbei eher von untergeordneter Rolle. Stärkere oder schwächere Beschleunigungen führen nicht zu veränderten Reaktionszeiten.
- Die Kombination „Beschleunigung-Kurvenaußen“ wird neben alleinigen Lenkungseingriffen gleicher Richtung mit den höchsten Störungsbewertungen der Kurvenfahrt versehen. Im Vergleich zu den übrigen Eingriffsbildern mit gleicher lateraler Richtung treten keine weiteren erhöhten Auslenkungen auf, die zudem schnell begrenzt werden. Es können keine Unterschiede zu den schnellen Reaktionen nach alleinigen Lenkeingriffen festgestellt werden. Die Kombination „Kurvenaußen-Beschleunigung“ wird zwar als störender erlebt, aber im Vergleich zu anderen Eingriffen besser kontrolliert und schnell begrenzt.
- Alleinige Lenkungseingriffe werden unabhängig von der Richtung und Intensität zu vergleichbar frühen Zeitpunkten begrenzt.

Spannweite der Gierrate

Die resultierenden Gierraten des Kurvenszenarios werden von Eigenschaften beider Eingriffsdimensionen beeinflusst (siehe Tabelle 27). Die Intensitäten, mit denen die Quer- und Längseingriffe ausgeführt werden, wirken unabhängig auf die laterale Fahrzeugreaktion. Stärkere Manipulationen der Querführung gehen mit größeren Veränderungen der Gierraten-Spannweite einher (siehe Abbildung 31a, $p_{A-B} < .001$). Dieser Effekt lässt sich anhand der Störungsbewertungen der Probanden nachvollziehen. Im Bereich der longitudinalen Komponente liegt jedoch eine veränderte Rangfolge vor. Mit alleinigen Lenkeingriffen lassen sich die höchsten Spannweiten feststellen ($M_0 = 2.09^\circ/s$, $SD = 1.48$), die sich von den übrigen Mittelwerten deutlich absetzen ($p_{0-I} < .001$; $p_{0-II} = .013$). Dieser Trend deckt sich nicht mit den wahrgenommenen Auswirkungen der Eingriffsbilder, da alleinige Lenkeingriffe weniger störend als intensivere Eingriffskombinationen wirken. Vielmehr scheinen sich die Auswirkungen stärkerer Quereingriffe anhand der lateralen Fahrzeugreaktion hier noch deutlicher zu zeigen, ohne dass sich dieses Verhältnis vollends in den Störungsbewertungen niederschlägt.

Darüber hinaus treten innerhalb der beiden Komponenten Wechselwirkungen zwischen der Richtung und der Intensität auf. Für den Bereich der lateralen Komponente zeigt sich, dass höhere Intensitäten (Intensität „B“) mit deutlich größeren Veränderungen der Spannweite einhergehen, als es sich für geringere Kräfte (Intensität „A“) feststellen lässt (siehe Anhang). Mit stärkeren Lenkeingriffen treten jedoch nur marginale Unterschiede zwischen den Fahrzeugreaktionen zum Kurveninneren- und -äußeren auf ($p_{BIn-Bau} = .087$). Werden schwächere Lenkeingriffe verwendet, resultieren größere Veränderungen

der Gierrate zum Kurvenäußeren als zum -inneren ($p_{\text{Aln-AAu}} < .001$). Mit stärkeren Lenkeingriffen innerhalb der Kurvenfahrt sinkt die Bedeutung der Richtung für die resultierende laterale Fahrzeugreaktion.

Tabelle 27: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Gierrate der Kurvenfahrt (df = 1; Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	129.71	<.001
Stärke des Längseingriffs	-	-	11.07	.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	27.10	<.001
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	4.47	.035
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I	-	10.56	.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	5.69	.018

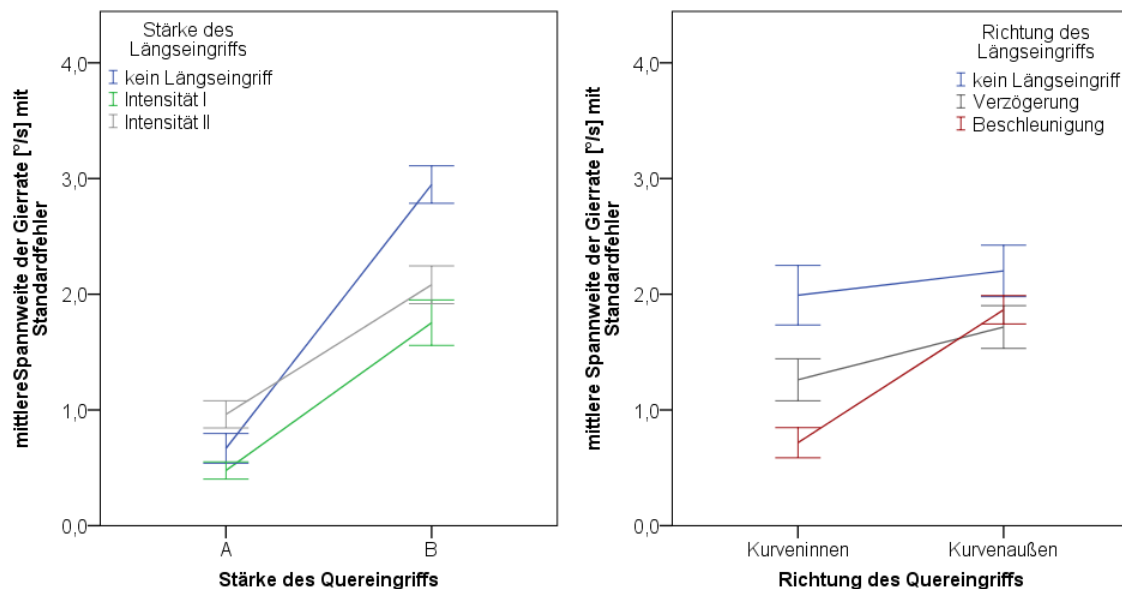


Abbildung 31: Darstellung der mittleren Spannweiten der Gierrate der Kurvenfahrt für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 31a, links) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 31b, rechts).

Die übergreifende Interaktion zwischen den Wirkrichtungen beider Dimensionen zeigt zwei wesentliche Aspekte. Zum einen kann die laterale Eingriffsrichtung für die Spannweite der Gierrate vernachlässigt werden, wenn das Fahrzeug abgebremst wird (siehe Abbildung 31b). Nur mit Beschleunigungen treten mit Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren höhere mittlere Spannweiten auf ($p_{\text{Beschln-BeschAu}} < .001$). Zum anderen zeigt sich, dass mit Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren keine wesentlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Eingriffen in die Längsführung existieren. Die deutlichen Unterschiede zwischen Beschleunigungen ($p_{\text{Beschln-Verzln}} = .016$); $p_{\text{Beschln-In}} < .001$), Verzögerungen ($p_{\text{Verzln-In}} = .025$) und alleinigen Lenkeingriffen für laterale Eingriffe zum Inneren der Kurve zeigen sich nicht mehr bei Lenkeingriffen zum Äußeren der Kurve. Lenkt das System aus der Kurve hinaus, ist es für die Spannweite der Gierrate unerheblich, ob bzw. in welcher Richtung in die Längsführung eingegriffen wird.

Das Muster der Störungsbewertungen lässt sich nur in Teilen anhand der Gierraten-Spannweite nachvollziehen. Zwar wirken die Intensitäten der beiden Dimensionen unabhängig auf die beiden Maße, weisen jedoch inhaltlich unterschiedliche Auswirkungen auf. Diese Auswirkungen alleiniger Lenkeingriffe übersteigen die Folgen ganzer, auch intensiverer Kombinationen deutlich. Dieses Verhältnis deutet sich zwar in den Störungsbewertungen an, in dem eindimensionale Lenkeingriffe nicht störender wirken als schwächere Kombinationen. Da komplette Kombinationen immer noch größere subjektive Auswirkungen haben, bilden sich die stärkeren lateralen Veränderungen nicht in letzter Konsequenz in den Wahrnehmungen der Fahrer ab. Für die Analyse der Richtungen zeigt sich ein ähnliches Verhältnis zwischen den subjektiven und objektiven Maßen. Die Rolle der Kombination „Beschleunigung-Kurvenaußen“ lässt sich anhand der Gierraten-Spannweite nur in Teilen nachvollziehen. Zwar zeigen sich mit Lenkeingriffen zum Äußeren der Kurve höhere Werte als zum Inneren. Insgesamt setzt sich diese Kombination nicht von den übrigen Kombinationen mit gleicher lateraler Richtung ab.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Gierrate des Kurvenszenarios:

- Die Veränderungen, denen die Gierrate unterliegt, werden ebenso wie die übrigen Maße von Eigenschaften beider Eingriffsdimensionen beeinflusst.
- Stärkere Lenkeingriffe gehen mit größeren Veränderungen der Gierrate einher. Zudem treten mit intensiveren Manipulationen keine Unterschiede zwischen Eingriffen zum Kurveninneren und -äußeren auf. Bei schwächeren Eingriffen lässt sich mit Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren eine größere Dynamik feststellen.
- Die Bedeutung der lateralen Eingriffsrichtung (Kurveninnen / -außen) sinkt, wenn a) intensivere Quereingriffe vorgenommen werden, oder b) Verzögerungen Teil der Eingriffskombinationen sind.
- Mit Beschleunigungen oder mit schwächeren Eingriffen in die Querführung treten zum Äußeren der Kurve größere Spannweiten auf.
- Lenkt das Fahrzeug zum Kurvenäußeren, ist die Intensität der longitudinalen Komponente für die Dynamik der Gierrate eher zweitrangig.
- Alleinige Lenkungseingriffe führen zu größeren Spannweiten der Gierrate als komplette Eingriffskombinationen.
- Das Muster der Gierraten-Spannweite kann nicht ohne weiteres in die Störungsbewertungen überführt werden. Zum Teil zeigen sich deutliche Auswirkungen der lateralen Komponente, die sich nur in abgeschwächter Form in den Bewertungen der Probanden nachvollziehen lassen. Darüber hinaus kommt der subjektiv störendsten Kombination „Beschleunigung-Kurvenaußen“ nur eine untergeordnete Rolle zu.

Spannweite der Längsbeschleunigung

Für die Veränderungen, denen die Längsbeschleunigung unterliegt, spielt die Intensität der lateralen Eingriffe auch innerhalb des Kurvenszenarios eine untergeordnete Rolle (siehe Tabelle 28). Stärkere longitudinale Komponenten gehen erwartungsgemäß mit größeren Spannweiten einher (siehe Abbildung 32a). Die Wechselwirkung innerhalb der longitudinalen Komponente bestätigt dieses Ergebnis (siehe Anhang). Darüber hinaus zeigt sich, dass nur im Falle von größeren Intensitäten geringere Spannweiten

bei Beschleunigungen auftreten. Starke Bremsmanöver gehen mit größeren Einflüssen auf die Längsbeschleunigung einher. Ein vergleichbarer Trend lässt sich nicht in den Bewertungen der Probanden feststellen.

Tabelle 28: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Längsbeschleunigung der Kurvenfahrt (df = 1; Fehler df = 365).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-		3.38	.066
Stärke des Längseingriffs	-		112.67	<.001
Richtung des Quereingriffs	-		5.32	.022
Richtung des Längseingriffs	-		8.01	.005
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I		6.33	.012
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z		7.30	.007

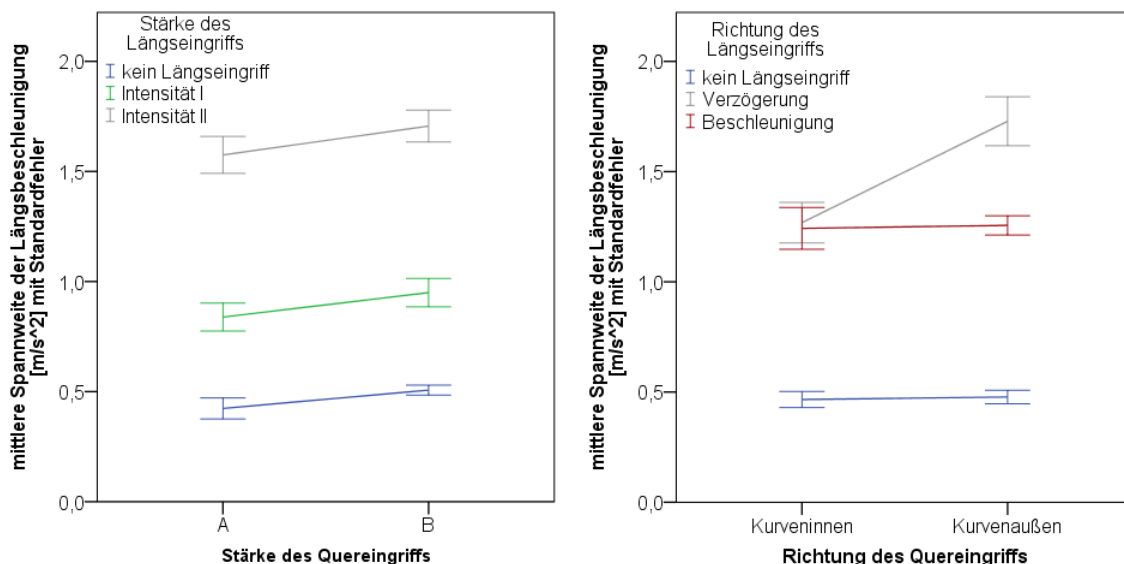


Abbildung 32: Darstellung der mittleren Spannweiten der Längsbeschleunigung der Kurvenfahrt für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 32a, links) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 32b, rechts).

Zudem wirken auch im Bereich der Längsbeschleunigung die Richtungen beider Komponenten im Rahmen einer Interaktion (siehe Abbildung 32b). Für Verzögerungen zeigt sich dabei ein auffälliger Verlauf. Mit Lenkeingriffen zum Kurveninneren lassen sich die Veränderungen der Längsbeschleunigung nicht von denen mit gleichzeitiger Beschleunigungskomponente unterscheiden ($p_{\text{BeschIn-VerzIn}} = .845$). Erst mit Lenkeingriffen zum Äußeren der Kurve treten nochmals erhöhte Auswirkungen auf, die sich deutlich von denen mit Beschleunigungen differenzieren lassen ($p_{\text{BeschAu-VerzAu}} = .026$). Insgesamt scheinen Verzögerungen mit höherer Intensität und in Kombination mit Lenkeingriffen zum Äußeren der Kurve mit den größten Auswirkungen auf das Fahrgeschehen einherzugehen. Dieses Muster widerspricht der subjektiven Wahrnehmung in einem wesentlichen Punkt. Zwar treten auch im Bereich der Wahrnehmung höhere Werte mit Lenkeingriffen zum Kurvenäußeren auf, zu störenderen Bewertungen führen jedoch

Kombinationen mit Beschleunigungskomponente. Liegen Verzögerungen an, können die Unterschiede zwischen lateralen Komponenten zum Kurveninneren und -äußeren vernachlässigt werden. Ebenso wie im Bereich der Geradeausfahrt kann der Spannweite der Längsbeschleunigung damit ein geringer Erklärungswert beigemessen werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Längsbeschleunigung des Kurvenszenarios:

- Stärkere Eingriffe in die Längsführung gehen mit größeren Spannweiten einher, insbesondere mit Bremsmanövern.
- Die Richtungen beider Komponenten beeinflussen die Dynamik der Längsbeschleunigung im Rahmen einer Interaktion. Lenkt das System zum Äußeren der Kurve, zeigen sich mit Bremseingriffen erhöhte Werte, nicht aber mit Beschleunigungen.
- Ein Bezug zwischen der Spannweite der Gierrate und den Störungsbewertungen ist erneut nur eingeschränkt möglich. Insbesondere Fehlerbilder mit Beschleunigungskomponente werden mit erhöhten Störungsbewertungen versehen, nicht aber Eingriffe mit Bremsmanövern.

5.2.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Kurvenfahrt

Ebenso wie für das Fahrscenario der Geradeausfahrt kann auch für das Kurvenszenario eine gute Beherrschbarkeit aller dargebotenen Eingriffe festgestellt werden. Die Fehlerbilder werden nicht als kritisch bewertet und liegen ebenfalls im Bereich „Störung des Fahrens“. Auch hier deckt der Vergleich der Auswirkungen in Abhängigkeit der verschiedenen Faktorenausprägungen- und -kombinationen relevante Beziehungen zwischen den beiden Dimensionen auf. Eingriffe zum Kurvenäußeren mit gleichzeitigen Beschleunigungen wirken störender als andere Eingriffsbilder, allerdings ohne dass eine kombinierte Darbietung von Quer- und Längseingriffen eine Voraussetzung für erhöhte Störungsbewertungen ist. Mit hoher Intensität dargebotene Lenkeingriffe können auch ohne weitere Komponente die subjektiven Folgen von schwächeren Kombinationen erreichen.

Diese Befunde können anhand des Lenkverhaltens nur in Teilen nachvollzogen werden, wenngleich keine kritische Fahrer-Fahrzeug-Interaktion festgestellt wird. Die Auslenkungen, die mit den verschiedenen Ausprägungen einhergehen, zeigen zum einen, dass die Intensität, mit der Brems- oder Beschleunigungsmanöver eingesetzt werden, keinen Einfluss auf den maximalen Lenkradwinkel hat. Zum anderen zeigt sich jedoch durch die Variation der Eingriffsrichtungen ein deutlicher Einfluss der longitudinalen Komponente auf ein Maß der Querführung. Mit Beschleunigungen lassen Fahrer größere Auslenkungen zu, wenn die Lenkeingriffe zum Inneren der Kurve ausgegeben werden. Mit Verzögerungen zeigt sich dieser Trend nicht. Darüber hinaus tritt ein weiteres relevantes Verhaltensmuster auf. Da die Kombination „Kurvenaußen-Beschleunigung“ störender bewertet wurde als die mit größeren Auslenkungen versehene Kombination „Kurveninnen-Beschleunigung“, kann davon ausgegangen werden, dass die verringerten maximalen Lenkradwinkel des erst genannten Fehlerbildes Ausdruck einer kompensatorischen Handlung sind. In gleicher Weise können auch die erhöhten Reaktionszeiten (Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels) bei Kombinationen mit stärkeren Bremsmanövern interpretiert werden. Diese weniger störenden Eingriffsbilder werden später begrenzt als Kombinationen mit negativeren Bewertungen. Hier zeigt sich die Tendenz zu angepassten

Fahrerreaktionen in umgekehrter Richtung. Demgegenüber wird auf Kombinationen mit stärkeren subjektiven Auswirkungen besser reagiert. Der Vergleich der maximalen Auslenkungen infolge der Kombination „Kurvenaußen-Beschleunigung“ zu weniger störenden Eingriffen mit gleicher lateraler Richtung zeigt geringere maximale Lenkradwinkel und frühere Begrenzungen. Ebenso werden alleinige Lenkeingriffe unter allen Bedienungen schnell kontrolliert. Im Mittel treten die maximalen Auslenkungen aller Versuchsbedingungen nach ca. 400 bis 700 ms auf.

Ein eindeutiger Bezug der Erlebens- und Verhaltensmaße auf die Spannweite der Gierrate scheint auch innerhalb des Kurvenszenarios nicht möglich. Zwar zeigten sich mit Eingriffen zum Kurvenäußeren größere Dynamiken, ohne dass sich diese Muster jedoch in den Störungsbewertungen niederschlagen. Abgesehen von diesem eingeschränkten Bezug beider Maße zeigen sich Verhaltensmuster, die sich nur durch das Zusammenspiel von Stärke und Richtungen der Komponenten erklären lassen. Unterschiede in den resultierenden Fahrzeugreaktionen zwischen den Richtungen Kurvenaußen und -innen treten insbesondere bei schwächeren Lenkeingriffen auf und relativieren sich mit stärkeren Eingriffen.

Ebenso wenig wie für die Veränderungen der Gierrate gelingt ein Bezug der Längsbeschleunigung auf die subjektiven Urteile der Probanden. Auch hier wirken sich größere Eingriffsintensitäten zwar stärker auf die Spannweite der Längsbeschleunigung aus. Hiervon sind jedoch eher Bremsmanöver betroffen, deren besondere Rolle auch anhand der Aufschlüsselung nach Eingriffsrichtungen deutlich wird. Damit stehen die Daten der longitudinalen Fahrzeugreaktion im Widerspruch zu dem Muster der Störungsbewertungen.

Aus methodischer Perspektive zeigen sich insbesondere anhand der lenkungsbezogenen Reaktionszeiten die vielfachen Abhängigkeiten der beiden Eingriffsdimensionen. Eine Dreifach-Interaktion zwischen der Stärke des lateralen Eingriffs und den Richtungen beider Dimensionen weist darauf hin, dass eine unabhängige Bewertung beider Komponenten, auch innerhalb des Kurvenszenarios, unzureichende Ergebnisse zur Beurteilung der Auswirkungen liefern würde. Tabelle 29 gibt einen Überblick über das Ausmaß, in dem die Auswirkungen der Eigenschaften beider Komponenten miteinander verflochten sind.

Tabelle 29: Zusammenfassung der vorliegenden Wechselwirkungen für die untersuchten Maße innerhalb des Kurvenszenarios.

	Störungs- bewertungen	maximaler Lenkrad-winkel	Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbe- schleunigung
Übergreifende Interaktion zwischen den Eingriffs- komponenten	Typ 2 (Richtung)	Typ 2 (Richtung)	Typ 2, 3, 5, 6	Typ 2 (Richtung)	Typ 2 (Richtung)
Interaktion von Stärke und Richtung innerhalb Komponenten	Längseingriff	Quereingriff	Längseingriff; Quereingriff	Längseingriff Quereingriff	Längseingriff

Im Vergleich zur Geradeausfahrt fällt die deutlich erhöhte Anzahl der Interaktionen sowohl innerhalb als auch zwischen den Komponenten auf. Weiterhin zeigt sich, dass die Variation beider Eingriffsrichtungen in allen Maßen zu einer Interaktion zwischen beiden Komponenten führt. Anders als für die Eingriffsintensitäten werden Verflechtungen zwischen beiden Komponenten hier deutlich sichtbar. Das Kurvenszenario zeigt insgesamt eine größere Sensitivität zur Aufdeckung von Einflüssen, die aus dem Zusammenspiel von Quer- und Längskomponenten resultieren. Inwieweit sich innerhalb dieses Fahr Szenarios ein korrelativer Bezug zwischen den subjektiven Störungsbewertungen und den resultierenden Fahrzeugreaktionen herstellen lässt, soll im Folgenden beschrieben werden.

5.2.2.2 Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen der Kurvenfahrt

Auch im Bereich der Kurvenfahrt wirken die verschiedenen Faktoren und Kombinationen nicht in vergleichbarer Weise auf die resultierenden Fahrzeugreaktionen und die Störungsbewertungen (siehe Tabelle 30). Klare Bezüge zwischen den Maßen können auch hier nicht festgestellt werden. Zwar finden sich im Bereich des Kurvenszenarios deutlich mehr übereinstimmende Wirkfaktoren als im Bereich der Geradeausfahrt. Für den Großteil der Maße lassen sich jedoch zusätzliche Auswirkungen feststellen, die in den subjektiven Wahrnehmungen nicht auftreten. Obwohl sich unter inhaltlichen Gesichtspunkten weniger Parallelen zeigen, treten zwischen der Spannweite der Längsbeschleunigung und den Störungsbewertungen die größten Gemeinsamkeiten auf. Auf das Maß der Spannweite wirkt nur eine zusätzliche Faktorenkombination (Stärke*Richtung des Längseingriffs), die im Bereich der Wahrnehmung nicht auftritt.

Tabelle 30: Aufgeführt sind die abhängigen Variablen und die Wirkfaktoren, einschließlich der möglichen Wechselwirkungen, für die Geradeausfahrt. Die subjektiven Störungsbewertungen und Verhaltensmaße unterliegen einem eher heterogenen Bild von Wirkfaktoren. Obwohl sich unter inhaltlichen Gesichtspunkten wenig Gemeinsamkeiten zwischen der Gierraten-Spannweite und den Störungsbewertungen zeigen, werden beide Maße weitgehend übereinstimmenden Wirkfaktoren beeinflusst.

Faktor / Faktoren-kombination	Art des Effekts	Störungs-bewertungen	Maximaler Lenkradwinkel	Zeitpunkt des max. Lenkrad-winkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längs-beschleunigung
Stärke des Längseingriffs	-	x		x	x	x
Stärke des Quereingriffs	-	x	x		x	x
Richtung des Quereingriffs	-	x	x	x	x	x
Richtung des Längseingriffs	-	x	x	x		x
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I				x	x
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I		x	x	x	
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z (Typ 3)			x		
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z (Typ 2)	x	x		x	x
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z (Typ.6)			x		
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z (Typ 6)			x		

Die Analyse der bivariaten Korrelationen zeigt jedoch äußerst geringe Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Maßen, wenngleich Parallelen zu den Ergebnissen der Geradeausfahrt auftreten. Auch im Bereich der Kurvenfahrt lassen sich für alleinige Lenkeingriffe signifikante Zusammenhänge zwischen

den wahrgenommenen Störungen und den Veränderungen der Gierrate feststellen ($r_K = .480$). Innerhalb des Kurvenszenarios stimmen beide Maße sogar geringfügig höher überein ($r_G = .438$). Der errechnete Zusammenhang bleibt allerdings auch hier unter dem in der Literatur berichteten Niveau. Wie bereits in Kapitel 5.2.1.2 beschrieben, kommen hierfür mehrere Gründe infrage. Als wichtigste Ursache wird jedoch die verwendete Berechnungsmethode vermutet, da hier die korrelativen Beziehungen anhand von Rohwerten und nicht anhand zuvor gebildeter Kategorien hergestellt werden. Zusammenhänge zwischen den Störungsbewertungen und dem maximalen Lenkradwinkel finden sich überhaupt nicht. Das Ausmaß, in dem Auslenkungen verursacht und zugelassen werden, steht in keinem Zusammenhang mit den Wahrnehmungen der Fehlerbilder.

Tabelle 31: Korrelative Zusammenhänge zwischen den subjektiven Störungsbewertungen, den erhobenen Verhaltensmaßen und den Veränderungsmaßen des Kurvenszenarios. Die Angabe der Korrelation erfolgt getrennt für alleinige Lenkeingriffe und vollständige Eingriffskombinationen.

		Störungsbewertungen für alleinige Lenkeingriffe	Störungsbewertungen für kombinierte Eingriffe
Maximaler Lenkradwinkel	Korrelation	-.104	.140**
	Signifikanz	.366	.005
	N	77	395
Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels	Korrelation	.109	-.026
	Signifikanz	.347	.608
	N	77	395
Spannweite der Gierrate	Korrelation	.480**	.293**
	Signifikanz	<.001	<.001
	N	77	395
Spannweite der Längsbeschleunigung	Korrelation	.205	.285**
	Signifikanz	.076	<.001
	N	76	395

Für die Eingriffskombinationen zeigen sich, wie im Bereich der Geradeausfahrt, signifikante Zusammenhänge zwischen den resultierenden Fahrzeugreaktionen beider Dimensionen und den Urteilen der Probanden. Da die tatsächlichen Korrelationen aber sehr gering ausfallen, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Wahrnehmung der Fehlerbilder nur sehr unzureichend durch die einzelnen Fahrzeugreaktionen vorhersagen lässt. Der maximale Lenkradwinkel kann für die Vorhersage der Störungsbewertungen aus gleichem Grund vernachlässigt werden.

5.2.3 Auswirkungen in der Engstelle

Störungsbewertungen

Die mittleren Störungsbewertungen der Engstelle gehen ebenfalls nicht über den störenden Bereich hinaus (siehe Abbildung 33a). Die Verwendung eines Engstellen-Szenarios bewirkt keinen überproportionalen Anstieg der Störungsbewertungen. Tabelle 32 zeigt zudem, dass die

wahrgenommenen Auswirkungen der Eingriffe von allen variierten Eigenschaften innerhalb verschiedener Haupteffekte und Wechselwirkungen abhängig sind. Die störenderen Auswirkungen stärkerer Lenkmomente lassen sich dabei eindeutig nachvollziehen. Wird zudem die Wechselwirkung zwischen Richtung und Intensität innerhalb der lateralen Komponente berücksichtigt (siehe Anhang), können diese Ergebnisse weiter differenziert werden. Lenkeingriffe nach links wirken störender als Eingriffe nach rechts, sofern eine hohe Intensität (Intensität „B“) vorliegt. Damit tritt erneut eine nicht erwartete Richtungsabhängigkeit auf, die in bisherigen Arbeiten nicht gefunden wurde (vgl. Kapitel 5.2.1).

In den Auswirkungen der longitudinalen Intensität zeigt sich zudem ein weiterer bereits bekannter Effekt. Alleinige Lenkeingriffe ($M_0 = 3.07$, $SD = 1.95$) werden zwar nicht so störend bewertet wie intensive Kombinationen ($M_{II} = 3.77$, $SD = 1.63$; $p_{0-II} = .004$), weisen aber im Vergleich zu Kombinationen mit schwächerer longitudinaler Komponente ($M_I = 2.95$, $SD = 1.60$) keine Unterschiede mehr auf ($p_{0-I} = .467$). Damit zeigt sich erneut, dass laterale Eingriffe nicht zwangsläufig schwächere Auswirkungen auf das subjektive Erleben haben bzw. kombinierte Eingriffe nicht per se stärkere Effekte auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion haben.

Tabelle 32: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die subjektiven Störungsbewertungen der Engstelle ($df = 1$; Fehler $df = 357$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	P
Stärke des Quereingriffs	-	-	94.04	<.001
Stärke des Längseingriffs	-	-	18.59	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	4.49	.035
Stärke des Quereingriffs * Richtung des Quereingriffs	I	-	4.56	.033
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	4.09	.044

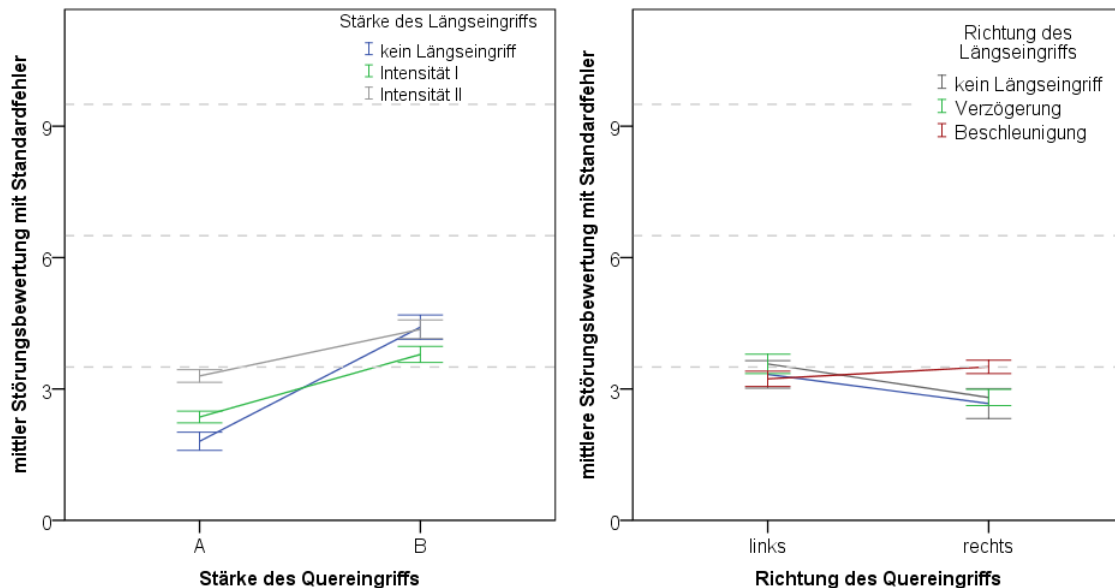


Abbildung 33a und b: Dargestellt sind die mittleren Störungsbewertungen der Engstelle für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 33a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 33b).

Wie schon in den obigen Analysen zeigt sich zudem eine wechselseitige Abhängigkeit der Störungsbewertungen von den Eingriffsrichtungen. Im Unterschied zu vorherigen Darstellungen stechen hier Eingriffe mit Beschleunigungskomponenten nicht aus den übrigen Eingriffen heraus. Werden Kombinationen mit lateralen Komponenten nach links aufgeschaltet, ist es für die subjektiv wahrgenommene Störung unerheblich, ob gleichzeitige Beschleunigungen stattfinden und von welcher Art diese sind. Die mittleren Bewertungen liegen alle an der unteren Grenze der „störenden“ Kategorie oder sogar knapp darunter (siehe Abbildung 33b). Werden Lenkmomente nach rechts aufgeschaltet, verringern sich die wahrgenommenen Auswirkungen für Kombinationen mit Verzögerungskomponenten weiter und erreichen ein sehr geringes Niveau ($M_{\text{Verzr}} = 2.80$, $SD = 1.58$, $p_{\text{Verzl-Verzr}} = .009$). Für Kombinationen mit Beschleunigungen und für alleinige Lenkeingriffe lassen sich hingegen keine Unterschiede feststellen. Die Auswirkungen von einfachen Lenkeingriffen lassen sich somit auch anhand dieser Aufschlüsselung nicht von den subjektiven Effekten ganzer Kombinationen unterscheiden.

Zusammenfassung der Ergebnisse für die Störungsbewertungen in der Engstelle:

- Die Störungsbewertungen erreichen innerhalb der Engstelle kein kritisches Niveau und verbleiben maximal im „störenden“ Bereich.
- Für die subjektive Wahrnehmung zeigen sich erneut Abhängigkeiten von allen Eigenschaften der Eingriffskombinationen. Eine getrennte Betrachtung der Eigenschaften von Längs- und Quereingriffen kann auch für den Bereich der Engstelle nicht empfohlen werden.
- Stärkere laterale Komponenten führen zu höheren Störungsbewertungen, insbesondere wenn Lenkeingriffe nach links vorgenommen werden.
- Einfache Lenkeingriffe können im Hinblick auf die Störungsbewertungen nicht von Eingriffskombinationen mit schwächerer longitudinaler Komponente unterschieden werden. Für die Aufschlüsselung der Daten anhand der Eingriffsrichtungen lässt sich zudem kein Unterschied zu Beschleunigungskombinationen feststellen.

- Insgesamt zeigt sich damit eine geringfügig erhöhte Sensitivität der Engstelle für laterale Komponenten, in dem die Auswirkungen von Beschleunigungskomponenten nicht mehr zu erhöhten Bewertungen führen. Eine bedeutsame Zunahme der wahrgenommenen Störungen kann jedoch nicht festgestellt werden.

Maximaler Lenkradwinkel

Die Ergebnisse zur maximal zugelassenen Auslenkung zeigen im Vergleich zu den übrigen Fahrscenarien eine deutlich begrenzte Anzahl der wirkenden Faktoren bzw. Wechselwirkungen (siehe Tabelle 33). Die Stärke, mit der in die Längsführung eingegriffen wird, ist für den maximalen Lenkradwinkel bedeutungslos. Mit stärkeren Lenkmomenten werden hingegen größere Auslenkungen zugelassen (siehe Abbildung 34a). Diese Ergebnisse lassen sich anhand der erhöhten Störungsbewertungen nachvollziehen.

Tabelle 33: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Beträge des maximalen Lenkradwinkels [°] der Engstelle (df = 1; Fehler df = 357).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	12.52	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	6.62	.011
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	22.78	<.001

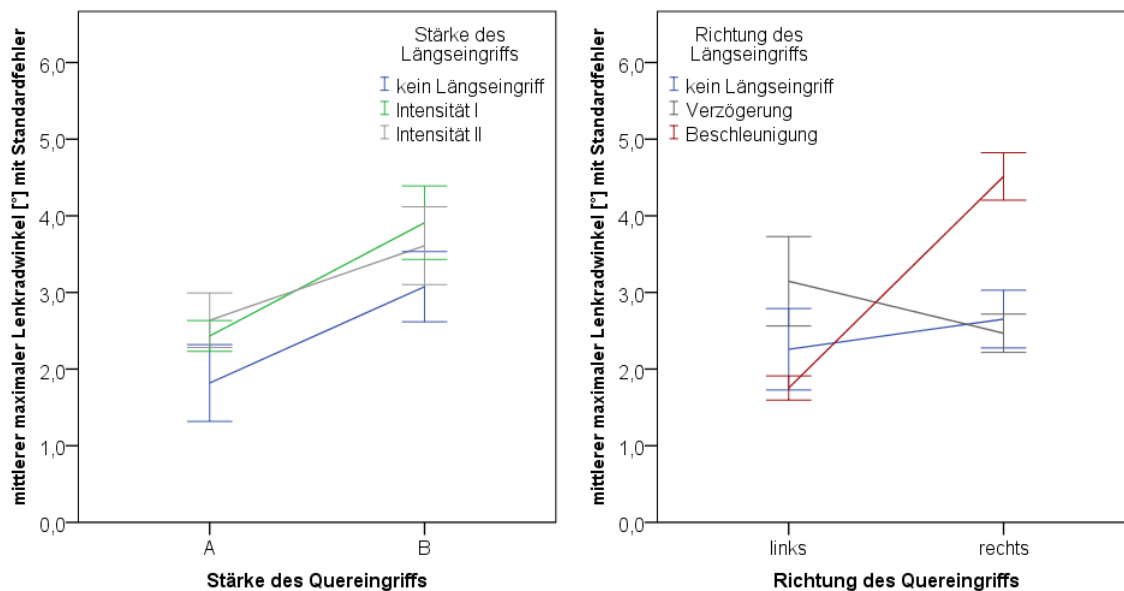


Abbildung 34a und b: Dargestellt sind die mittleren Beträge des maximalen Lenkradwinkels [°] der Engstelle für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 34a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 34b).

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Richtungskombinationen zeigen ein komplexeres Muster. Hierbei zeigt sich erneut die schon oben beschriebene Richtungsabhängigkeit. Mit Lenkeingriffen nach links können für Verzögerungen größere maximale Auslenkungen festgestellt werden, als es für Beschleunigungen der Fall ist ($p_{\text{Verz}-\text{Beschl}} = .024$). Da hier auf subjektiver Ebene keine Unterschiede auftreten, kann eine Interpretation der Befunde nur schwer vorgenommen werden. Weitere Unterschiede

treten hier nicht auf. Weisen die lateralen Komponenten nach rechts, kehrt sich diese Verhältnis um. Werden zeitgleich Beschleunigungen dargeboten, treten im Vergleich zu Verzögerungen und einfachen Lenkeingriffen deutlich erhöhte Lenkradwinkel auf ($M_{\text{Beschr}} = 4,53^\circ$, $SD = 3,16$, $p_{\text{Verzr-Beschr}} < .001$). Dieses Ergebnismuster lässt sich grundsätzlich mit den subjektiven Bewertungen in Einklang bringen, da sich hier keine Verringerung der Störungsbewertungen feststellen lässt. Dennoch werden keine erhöhten Bewertungen vergeben, sodass sich kein klarer Bezug beider Maße vornehmen lässt. Die Tatsache, dass die mittleren maximalen zugelassenen Auslenkungen nur ca. 4.5° betragen, spricht für eine geringe Kritikalität und erklärt zudem die Bewertungen innerhalb des „störenden“ Bereiches. Unterschiede zwischen alleinigen Lenkeingriffen nach rechts und Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponenten treten hier nicht mehr auf ($p_{0r\text{-}Verzr} < .672$). Ebenso zeigt der Vergleich der mittleren maximalen Lenkradwinkel zwischen den lateralen Richtungen links und rechts für beide Eingriffsbilder nur tendenzielle Veränderungen ($p_{0l\text{-}0r} < .591$; $p_{\text{Verzl-Verzr}} < .287$).

Zusammenfassung der Ergebnisse zum maximalen Lenkradwinkel der Engstelle:

- Es werden sehr wenige Faktoren bzw. deren Kombinationen wirksam. Die Intensität, mit der in die Längsführung eingegriffen wird, wirkt sich überhaupt nicht auf die zugelassene Auslenkung aus.
- Insgesamt zeigen sich relativ geringe mittlere maximale Auslenkungen, die 5° nicht übersteigen. Vor dem Hintergrund der niedrigen Störungsbewertungen können diese Auslenkungen als absolut unkritisch angesehen werden.
- Intensivere Eingriffe in die Querführung gehen mit größeren Auslenkungen und höheren Störungsbewertungen einher. Die Erlebens- und Verhaltensmuster sind hier konsistent.
- Die zuvor festgestellte Richtungsabhängigkeit zeigt sich auch innerhalb der maximal zugelassenen Auslenkungen. Liegen Lenkeingriffe nach links vor, treten mit Verzögerungen geringfügig erhöhte Auslenkungen auf. Mit Lenkeingriffen nach rechts werden größere Auslenkungen mit Beschleunigungen zugelassen, die von stabilen Störungsbewertungen begleitet werden. Der augenscheinliche Zusammenhang zwischen dem Erlebens- und Verhaltensmaß ist hier eher gering.
- Einfache Lenkeingriffe haben im Vergleich zu den übrigen Eingriffsbildern keine außergewöhnlichen Auswirkungen auf den maximalen Lenkradwinkel.

Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels

Die Analyse des Zeitpunktes⁴, zu dem der laterale Eingriff begrenzt wurde, zeigt einen bisher noch nicht aufgetretenen Befund. Weder die longitudinale noch die laterale Eingriffsintensität haben einen Einfluss auf die Lenkungsbezogene Reaktionsgeschwindigkeit (siehe Tabelle 34). Systematische Auswirkungen konnten nur für die unterschiedlichen Richtungskombinationen in Form einer Wechselwirkung festgestellt werden.

⁴ Aufgrund von technischen Problemen konnten hier nur die Daten von 324 Fällen berücksichtigt werden.

Tabelle 34: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für den Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels [s] der Engstelle (df = 1; Fehler df = 292).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	P
Richtung des Quereingriffs *				
Richtung des Längseingriffs	Z	2	5.355	.021

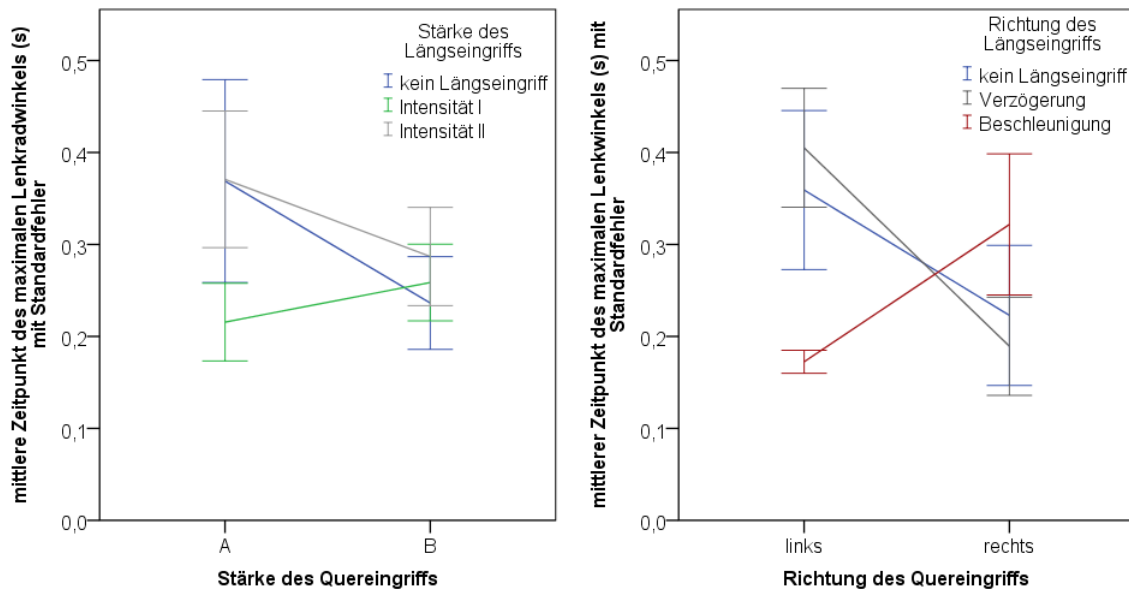


Abbildung 35a und b: Dargestellt sind die mittleren Beträge des maximalen Lenkradwinkels [°] der Engstelle für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 35a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 35b).

Die mittleren lenkradbezogenen Reaktionszeiten des Engstellenszenarios liegen in einem Bereich zwischen 170 und 410 ms und können damit als sehr schnell bis schnell angesehen werden. Auch hier lassen sich zumindest in Teilen die oben angesprochenen lateralen Richtungsabhängigkeiten feststellen. Am deutlichsten werden diese Unterschiede für Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponente. Werden hierbei Lenkeingriffe nach rechts aufgeschaltet, treten die maximalen Auslenkungen ca. 200 ms früher auf als in entgegengesetzte Richtung ($M_{\text{Verzl}} = 410 \text{ ms}$, $SD = .539$; $p_{\text{Verzl-Verzr}} = .011$). Die übrigen Vergleiche erreichen hingegen kein signifikantes Niveau.

Für die Vergleiche der longitudinalen Eingriffsrichtung zeigen sich jedoch weitere Unterschiede. Besonders deutlich wird die Rolle der Längskomponente erneut mit Beschleunigungseingriffen. Werden hierbei gleichzeitig Lenkeingriffe nach links aufgeschaltet, begrenzen Fahrer den Ausschlag der Lenkung bereits nach 170 ms und zeigen damit äußerst schnelle Reaktionen. Demgegenüber sind die Reaktionszeiten für einfache Lenkeingriffe und mit Verzögerungskomponenten verlangsamt ($p_{\text{Beschl-I}} = .040$; $p_{\text{Beschl-Verz}} = .001$). Werden statt der Lenkeingriffe nach links Lenkmomente nach rechts aufgeschaltet, treten mit Beschleunigungen tendenziell etwas verlangsamte Reaktionen auf ($M_{\text{Beschr}} = .320$; $SD = .574$; $p_{\text{Beschl-Beschr}} = .060$). Unterschiede in Abhängigkeit der longitudinalen Komponenten können für Kombinationen mit Lenkeingriffen nach rechts hingegen nicht festgestellt werden.

Kombinationen, die aus Beschleunigungen und Lenkeingriffen nach rechts bestehen, gehen damit im Vergleich zur lateralen Gegenrichtung mit leicht erhöhten Auslenkungen und geringfügig erhöhten

Reaktionszeiten einher. Beide Kennwerte können jedoch als absolut unkritisch betrachtet werden, da nur sehr geringe mittlere Auslenkungen auftreten (ca. 4.5°) und diese im Mittel zudem sehr schnell begrenzt werden (nach ca. 320 ms). Beide lenkradbezogenen Maße unterstreichen die niedrigen Störungsbewertungen dieses Eingriffsbildes.

Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Zeitpunkten des maximalen Lenkradwinkels der Engstelle:

- Die Eingriffsintensitäten üben keinerlei systematischen Einfluss auf den Zeitpunkt der maximalen Auslenkung aus. Stärkere Lenkeingriffe oder Beschleunigungen gehen im Vergleich zu schwächeren Komponenten nicht mit veränderten Reaktionszeiten einher.
- Die Eingriffsrichtungen beider Dimensionen wirken im Rahmen einer Wechselwirkung auf den Zeitpunkt der maximalen Auslenkung, sodass die Notwendigkeit einer gemeinsamen Betrachtung beider Dimensionen erneut deutlich wird.
- Die mittleren Reaktionszeiten bewegen sich in einer Spanne von ca. 170 bis 410 ms und können insgesamt als sehr schnell bezeichnet werden.
- Beschleunigungen in Kombinationen mit Lenkeingriffen nach rechts gehen mit leicht erhöhten Auslenkungen einher und werden auch etwas später begrenzt. Da die absoluten Kennwerte jedoch immer noch für eine sehr gute Reaktion sprechen und die subjektiven Störungsbewertungen sehr niedrig sind, kann dieses Eingriffsbild als absolut unkritisch angesehen werden.

Spannweite der Gierrate

Die Veränderungen der Gierrate werden innerhalb der Engstelle ebenfalls ausschließlich durch Eigenschaften der lateralen Komponenten beeinflusst (siehe Tabelle 35). Insgesamt treten hier sehr geringe mittlere Spannweiten auf ($<3^\circ$), die sich unter anderem durch die schnellen Begrenzungen des Lenkeingriffs erklären lassen. Dabei entsprechen die Einflussfaktoren den Wirkfaktoren des maximalen Lenkradwinkels, ohne jedoch in inhaltlicher Hinsicht ein identisches Muster aufzuweisen. Für die Intensität der Lenkeingriffe (siehe Abbildung 36a) zeigen sich dabei zunächst vergleichbare Trends, indem stärkere Signale mit größeren Spannweiten einhergehen. Die Intensität der Längsführung spielt hierbei keine Rolle. Diese Tatsache macht einen wesentlichen Unterschied zu dem Muster der Störungsbewertungen aus, da hier die Intensität der Längsführung klar zum Ausdruck kommt. Eine alleinige Verwendung der Gierraten-Spannweite zur Vorhersage der Subjektivbewertungen wird sich daher auch nicht durch das Engstellenszenario zeigen lassen (siehe Kapitel 5.2.3.21.1.1.1).

Tabelle 35: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Gierrate [$^\circ/\text{s}$] der Engstelle (df = 1; Fehler df = 357).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	92.67	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	3.11	.079
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	4.98	.026

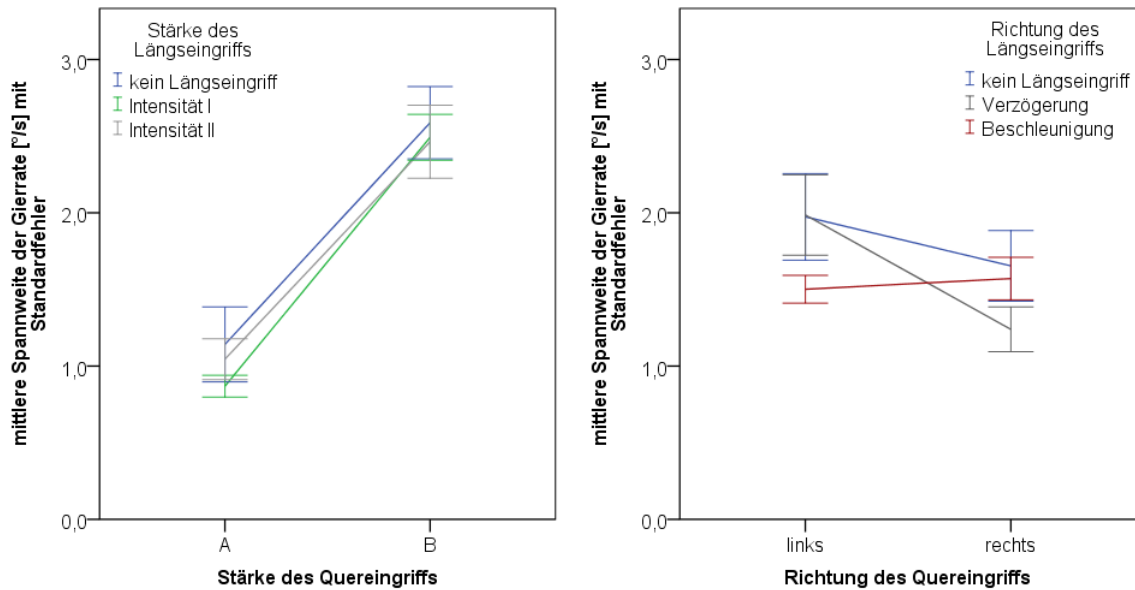


Abbildung 36. Dargestellt sind die mittleren Beträge des maximalen Lenkradwinkels [°] der Engstelle für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 36a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 36b).

Verglichen mit dem Muster der Eingriffsintensitäten zeigen sich für die Eingriffsrichtungen stärkere Abweichungen zu den Ergebnissen des maximalen Lenkradwinkels. Werden die Daten der Gierrate jedoch mit den Störungsbewertungen verglichen, zeigen sich verschiedene Parallelen, wenngleich keine Kongruenz vorliegt. Treten Lenkeingriffe nach links auf, ist es nahezu bedeutungslos ob und wie gleichzeitig in die Längsführung eingegriffen wird. Allenfalls Kombinationen mit Beschleunigungskomponente setzen sich tendenziell von den Fehlerbildern mit Verzögerungen ab ($p_{\text{Verz-Beschl}} = .084$). Dieser Befund lässt sich eindeutig anhand der subjektiven Störungsbewertungen nachvollziehen. Mit Lenkeingriffen nach rechts verändert sich dieses Muster, da sich, wie im Bereich der Störungsbewertungen, die Auswirkungen mit Verzögerungskomponente verringern. Für die übrigen Eingriffsbilder lassen sich hingegen keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit der lateralen Richtung finden. Die Veränderungen mit Verzögerungen sind dabei so deutlich, dass zwischen den Fehlerbildern mit lateralen Komponenten nach rechts gar keine Unterschiede mehr festgestellt werden können. Alleinige Lenkeingriffe und Kombinationen mit Beschleunigungskomponenten stechen damit weder innerhalb der Störungsbewertungen noch innerhalb der Gierraten-Spannweite hervor. Obwohl im Vergleich zur Gegenrichtung erhöhte Lenkradwinkel-Maxima auftreten und diese etwas später begrenzt werden, lassen sich damit keine wesentlichen Auswirkungen auf das Fahrer-Fahrzeug-System feststellen.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Gierrate der Engstelle

- Es treten relativ geringe Spannweiten der Gierrate ($<3^\circ$) und damit geringe resultierende Fahrzeugreaktionen auf.
- Stärkere Eingriffe in die Querführung gehen mit stärkeren Veränderungen der Gierrate einher.

- Für Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponente lässt sich die bereits oben identifizierte laterale Richtungsabhängigkeit feststellen, indem geringere Fahrzeugreaktionen auftreten, wenn Lenkeingriffe nach rechts dargeboten werden.
- Einfache Lenkeingriffe und Kombinationen mit Beschleunigungskomponente nehmen innerhalb des Engstellen-Szenarios keinen besonderen Platz ein und stechen nicht in den mittleren Spannweiten der Gierrate hervor.
- Die Intensität der longitudinalen Eingriffe äußert sich nicht in den lateralen Fahrzeugreaktionen. Davon abgesehen sind die inhaltlichen Muster mit den wahrgenommenen Störungen innerhalb der Engstelle gut vergleichbar.

Spannweite der Längsbeschleunigung

Die Veränderungen der Längsbeschleunigungen werden ausschließlich durch Eigenschaften der longitudinalen Komponente beeinflusst (siehe Tabelle 36). Beide Eigenschaften (Intensität und Richtung) wirken dabei wechselseitig auf die longitudinale Fahrzeugreaktion. Für eine konsistente Ergebnisdarstellung werden trotzdem die zuvor verwendeten Diagrammtypen beibehalten. Die Einflüsse der longitudinalen Eingriffsintensität (siehe Abbildung 37a) sind dabei deutlich sichtbar.

Tabelle 36: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Längsbeschleunigung [m/s^2] der Engstelle ($df = 1$; Fehler $df = 357$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Längseingriffs	-	-	159.55	<.001
Richtung des Längseingriffs	-	-	8.69	.003
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I		58.87	<.001

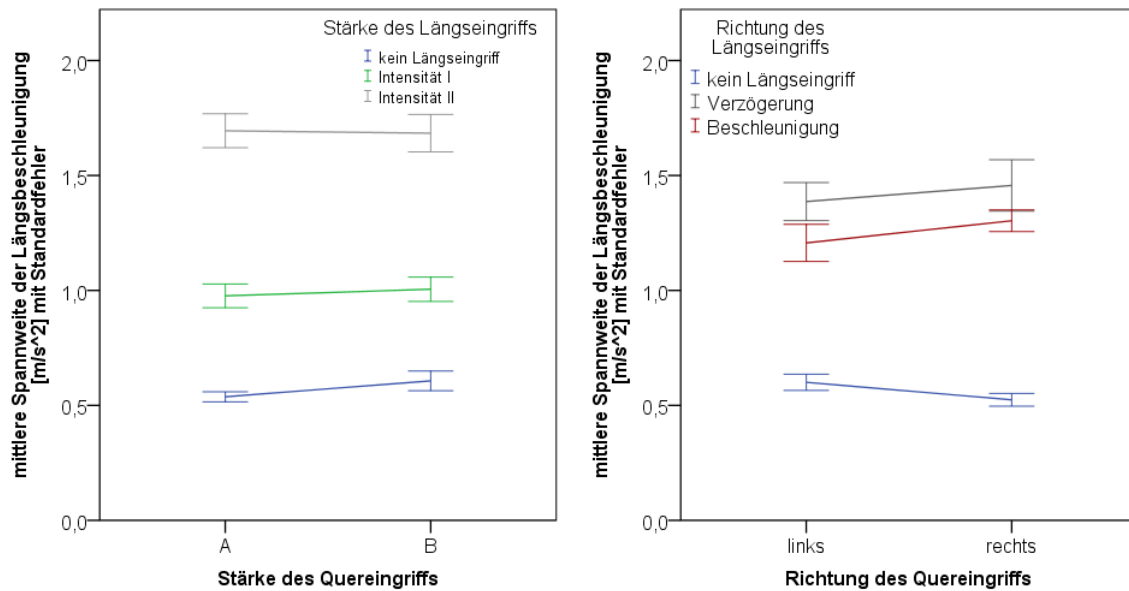


Abbildung 37a und b: Dargestellt sind die mittleren Beträge der Spannweite der Längsbeschleunigung [m/s^2] der Engstelle für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 37a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 37b).

Die Analyse der Wechselwirkung (siehe Anhang) differenziert die Ergebnisse jedoch weiter. Werden schwächere longitudinale Komponenten als Teil von Eingriffskombinationen verwendet, sind geringere Veränderungen zu beobachten ($M_{\text{VerzI}} = 0.81 \text{ m/s}^2$, $SD = 0,33$) als bei schwächeren positiven Beschleunigungen ($M_{\text{BeschlI}} = 1.10 \text{ m/s}^2$, $SD = 0,056$; $p_{\text{VerzI-BeschlI}} < .001$). Mit höheren Intensitäten ändert sich dieses Muster, da stärkere Verzögerungen mit größeren Spannweiten ($M_{\text{VerzII}} = 2.00 \text{ m/s}^2$, $SD = 0,53$) als stärkere positive Beschleunigungen einhergehen ($M_{\text{BeschlII}} = 1.45 \text{ m/s}^2$, $SD = 0,067$; $p_{\text{VerzII-BeschlII}} < .001$). Ein direkter Bezug dieses Musters auf die Störungsbewertungen kann damit nicht vorgenommen werden. Dennoch scheinen Beschleunigungskomponenten hier relativ geringe Auswirkungen auf die resultierende Fahrzeugreaktion zu zeigen. Die relativ geringen Störungsbewertungen lassen sich damit grundsätzlich nachvollziehen. Verzögerungskomponenten haben hingegen einen stärkeren Einfluss auf die Fahrzeuginnenführung, werden aber offensichtlich aufgrund ihrer Richtung nicht mit höheren Störungsbewertungen versehen.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Längsbeschleunigung der Engstelle:

- Die Spannweite der Längsbeschleunigung wird ausschließlich von Eigenschaften der longitudinalen Eingriffskomponente beeinflusst.
- Intensität und Richtung wirken dabei wechselseitig auf die Veränderungen. Mit schwächeren Intensitäten haben positive Beschleunigungen größere Auswirkungen, mit stärkeren Intensitäten Verzögerungen.
- Dieses Muster lässt sich nicht ohne weiteres in die subjektiven Bewertungen überführen, da stärkere Veränderungen der Längsbeschleunigung infolge der Verzögerungen nicht mit erhöhten Störungsbewertungen versehen werden. Die hier verwendeten Bremseneingriffe werden offenbar aufgrund ihrer Richtung nicht als kritisch betrachtet.

5.2.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Engstelle

Insgesamt kann für alle Fehlerbilder der Engstelle eine problemlose Beherrschbarkeit festgestellt werden. Die mittleren subjektiven Störungsbewertungen zeigen Maximalwerte im „störenden“ Bereich und liegen im augenscheinlichen Vergleich noch unter den Bewertungen der übrigen Szenarien. Darüber hinaus weisen die Verhaltensmaße keine nennenswerten Besonderheiten auf. Die besondere Sensitivität für die Auswirkungen lateraler Eingriffskomponenten lässt sich hier nur eingeschränkt zeigen. Als Grund hierfür kommen erneut die gewählten Eingriffsintensitäten infrage. Die Ergebnisse anderer Studien lassen darauf schließen, dass hier verhältnismäßig schwache Lenkmomente verwendet wurden.

Fehlerbilder, die in den übrigen Szenarien hervorstechende Auswirkungen verursacht haben (z. B. Kombinationen mit Beschleunigungskomponente oder einfache Lenkeingriffe), kommen innerhalb der Engstelle nicht im vollen Umfang zur Geltung. Dennoch lässt sich auch hier feststellen, dass einfache Lenkeingriffe subjektive Auswirkungen erreichen können, die sich nicht mehr von schwächeren, aber vollständigen Kombinationen unterscheiden lassen. In der Engstelle lässt sich dieser Effekt sogar im Vergleich zu Eingriffskombinationen mit Beschleunigungskomponente zeigen. Da die Störungsbewertungen hier jedoch insgesamt sehr moderat ausfallen, sprechen diese Befunde nur für eine eingeschränkt erhöhte Sensitivität.

Des Weiteren können für Kombinationen mit Beschleunigungskomponente innerhalb der Engstelle geringfügig erhöhte Auslenkungen festgestellt werden, besonders dann, wenn zeitgleich Lenkeingriffe nach rechts aufgeschaltet werden. Zudem werden diese Eingriffsbilder, verglichen mit Fehlerbildern, die die gleiche laterale Komponente aufweisen, etwas später begrenzt. Da die mittleren absoluten Auslenkungen und die dazugehörigen mittleren Reaktionszeiten jedoch sehr gering sind (ca. 4,5° nach 200 ms), und zudem keine kritischen Bewertungen auftreten, können auch diese Eingriffe als absolut problemlos angesehen werden.

Die schon in der Geradeausfahrt festgestellte laterale Richtungsabhängigkeit tritt auch in der Engstelle auf. Dieser Effekt zeigt sich insbesondere in Verbindung mit Verzögerungen und lässt sich anhand verschiedener Kennwerte nachvollziehen. Auch innerhalb dieses Szenarios fällt die Benennung einer Ursache schwer, zumal infrastrukturelle Gründe hier weniger in Frage kommen als innerhalb der Geradeausfahrt.

Obwohl unter inhaltlichen Gesichtspunkten keine deutlich erhöhte Sensitivität des Engstellen-Szenarios festgestellt werden kann, liegt dennoch eine Besonderheit vor. Innerhalb der Engstelle wirken die Eigenschaften der Eingriffsdimensionen isolierter auf die zugehörigen Maße. Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsintensität lassen sich in den lenkungsbezogenen Maßen überhaupt nicht feststellen, Einflüsse der Richtung werden nur im Rahmen einer Wechselwirkung wirksam (siehe Tabelle 37). Für die Spannweite der Gierreaktion lassen sich überhaupt keine Auswirkungen der longitudinalen Komponente feststellen. Die insgesamt relativ geringen Fahrzeugreaktionen (mittlere maximale Spannweite < 3°) lassen sich anhand der Störungsbewertungen dennoch gut nachvollziehen. Gleiches gilt allerdings nicht für die Spannweite der Längsbeschleunigung, da die hier auftretenden Muster sich nicht in vergleichbarer Weise in den Störungsbewertungen wiederfinden.

Tabelle 37: Zusammenfassung der vorliegenden Wechselwirkungen für die untersuchten Maße innerhalb der Engstelle.

	Störungs- bewertungen	maximaler Lenkrad- winkel	Zeitpunkt des maximalen Lenkrad- winkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbe- schleunigung
Übergreifende Interaktion zwischen den Eingriffs- komponenten	Typ „2“ (Richtung)	Typ „2“ (Richtung)	Typ „2“ (Richtung)	Typ „2“ (Richtung)	
Interaktion von Stärke und Richtung innerhalb Komponenten	Quereingriffs				Längseingriff

Insgesamt fällt die im Vergleich zum Kurven-Szenario deutlich reduzierte Anzahl der Interaktionen, insbesondere innerhalb der Komponenten, auf. Da in den meisten Fällen jedoch übergreifende Wechselwirkungen zwischen den Eingriffskomponenten auftreten, muss an einer gemeinsamen Betrachtung beider Komponenten festgehalten werden. Die übergreifende Interaktion bezieht sich dabei immer auf die Eingriffsrichtung und macht damit deutlich, dass die verschiedenen Richtungskombinationen zu klaren Unterschieden im Erleben und Verhalten führen können.

5.2.3.2 Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen der Engstelle

Insgesamt wirken innerhalb der Engstelle deutlich weniger Faktoren bzw. Wechselwirkungen auf das Verhalten und Erleben als innerhalb des Kurvenszenarios. Damit einhergehend wirken die Faktoren wesentlich homogener (siehe Tabelle 38). In nahezu allen Maßen kann eine wechselseitige Beeinflussung durch die beiden Eingriffsrichtungen festgestellt werden. Nur die Spannweite der Längsbeschleunigung erfährt hier keinerlei Einfluss durch die laterale Komponente. Darüber hinaus fällt auf, dass Wechselwirkungen innerhalb der Eingriffskomponenten sehr selten auftreten. Wie bereits oben erwähnt, zeigt sich damit insgesamt, dass die Effekte innerhalb der Engstelle unabhängiger auftreten als es für die Geradeausfahrt und das Kurvenszenario der Fall ist. Für den Bereich der resultierenden Fahrzeugreaktionen treten unterschiedliche Befunde auf. Die Spannweite der Gierrate und die Störungsbewertungen unterliegen nahezu identischen Einflüssen. Nur die Stärke des Längseingriffs lässt sich nicht in den Gierreaktionen nachweisen.

Tabelle 38: Die Tabelle führt die abhängigen Variablen und die Wirkfaktoren für die Geradeausfahrt, einschließlich der möglichen Wechselwirkungen, auf. Die subjektiven Störungsbewertungen werden in vielfacher Hinsicht von den gleichen Faktoren beeinflusst. Insgesamt treten kaum Wechselwirkungen auf, Wirkfaktoren werden häufiger unabhängig voneinander wirksam. Die Spannweite der Längsbeschleunigung hat eine Sonderrolle.

Faktor / Faktoren-kombination	Art des Effekts	Störungsbewertungen	Maximaler Lenkradwinkel	Zeitpunkt des max. Lenkradwinkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbeschleunigung
Stärke des Längseingriffs	-	x				x
Stärke des Quereingriffs	-	x	x		x	
Richtung des Quereingriffs	-	x	x		x	
Richtung des Längseingriffs	-					x
Stärke des Längseingriffs *	I					x
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	I	x				
Richtung des Quereingriffs						
Richtung des Quereingriffs *	Z	x	x	x	x	
Richtung des Längseingriffs	(„Typ 2“)					

Die Spannweite der Längsbeschleunigung nimmt eine Sonderrolle ein, da hier größtenteils andere Faktoren wirken. Dabei werden sowohl die longitudinale Intensität als auch die Eingriffsrichtung sowie die Wechselwirkung beider Größen wirksam. Dieses Muster findet sich nicht in vergleichbarer Form in den Wahrnehmungen der Probanden wieder. Die korrelative Analyse der Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen verdeutlicht diese Ergebnisse (siehe Tabelle 39).

Tabelle 39: Korrelative Zusammenhänge zwischen den subjektiven Störungsbewertungen, den erhobenen Verhaltensmaßen und den Veränderungsmaßen des Kurvenszenarios. Die Angabe der Korrelation erfolgt getrennt für alleinige Lenkeingriffe und vollständige Eingriffskombinationen.

		Störungsbewertungen für alleinige Lenkeingriffe	Störungsbewertungen für kombinierte Eingriffe
Maximaler Lenkradwinkel	Korrelation	.173	.043
	Signifikanz	.153	.444
	N	70	327

Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels	Korrelation	-.103	-.033
	Signifikanz	.396	.554
	N	70	327
Spannweite der Gierrate (Kategorien)	Korrelation	.584	.352
	Signifikanz	<.001	<.001
	N	59	327
Spannweite der Längsbeschleunigung (Kategorien)	Korrelation	.396	.257
	Signifikanz	<.001	<.001
	N	62	282

Wie in den oben dargestellten Ergebnissen zur Geradeaus- und Kurvenfahrt sind hier die Korrelationen getrennt für alleinige Lenkeingriffe und Eingriffskombinationen angegeben. Gemessen an den bisherigen Ergebnissen zeigen sich für die Engstelle relativ hohe Zusammenhänge ($r = .584$). Da anhand der Rohdaten bisher keine vergleichbar engen Beziehungen aufgedeckt werden konnten, sprechen diese Ergebnisse für die erhöhte laterale Sensitivität des Engstellenszenarios. Die Zusammenhänge zwischen den subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen und den Veränderungen der Längsbeschleunigung fallen dagegen deutlich geringer aus.

Für die Zusammenhänge zwischen Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen im Bereich der kombinierten Eingriffe zeigen sich schlechtere Korrelationen. Sowohl die Zusammenhänge zur Spannweite der Gierrate als auch zur Spannweite der Längsbeschleunigung verringern sich weiter, sodass hier nahezu kein Erklärungswert mehr vorhanden ist. Eine Vorhersage des subjektiven Erlebens infolge von kombinierten Eingriffen ist damit weder einzeln anhand der auftretenden Veränderungen der Gierrate noch anhand der Längsbeschleunigungen bzw. deren Veränderungen möglich.

5.2.4 Auswirkungen innerhalb des Fahrstreifenwechsels

Störungsbewertungen

Die Störungsbewertungen des Fahrstreifenwechsels zeigen, dass die aufgeschalteten Fehlerbilder deutlich unterhalb eines kritischen Niveaus liegen. Der Bereich der „Störung des Fahrens“ wird nicht verlassen, der Großteil der mittleren Bewertungen liegt zudem im Bereich „spürbar“. Tabelle 40 zeigt, dass die wahrgenommenen Auswirkungen der Fehlerbilder innerhalb des Fahrstreifenwechsels von allen untersuchten Faktoren abhängig sind bzw. in Form von Wechselwirkungen wirksam werden. Dabei wirken die Intensitäten beider Eingriffsdimensionen unabhängig voneinander auf die Wahrnehmung. Stärkere Lenkmomente gehen mit höheren Störungsbewertungen einher (Abbildung 38a; $p_{A-B} < .001$). Für die longitudinale Intensität lässt sich ein bereits bekanntes Muster feststellen, bei dem alleinige Lenkeingriffe ($M_0 = 2.96$, $SD = 1.72$) und schwächere Kombinationen ($M_I = 2.95$, $SD = 1.63$) im direkten Vergleich nicht unterschieden werden können ($p_{0-I} = .806$), sich aber im Mittel beide von stärkeren Fehlerbildern absetzen ($p_{0-II} < .001$; $p_{I-II} < .001$). Die Interaktion zwischen Stärke und Richtung der longitudinalen Komponente (siehe Anhang) differenziert dieses Ergebnis weiter, indem mit niedrigen Intensitäten noch größere Störungen für Eingriffe mit positiver Beschleunigung angegeben werden ($p_{\text{VerzI-BeschI}} < .001$), diese aber mit höheren Intensitäten nicht mehr feststellbar sind ($p_{\text{VerzII-BeschII}} = .408$).

Tabelle 40: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die subjektiven Störungsbewertungen des Fahrstreifenwechsels ($df = 1$; Fehler $df = 362$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	63.02	<.001
Stärke des Längseingriffs	-	-	31.13	<.001
Richtung des Längseingriffs	-	-	8.23	.004
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	11.62	.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	16.13	<.001

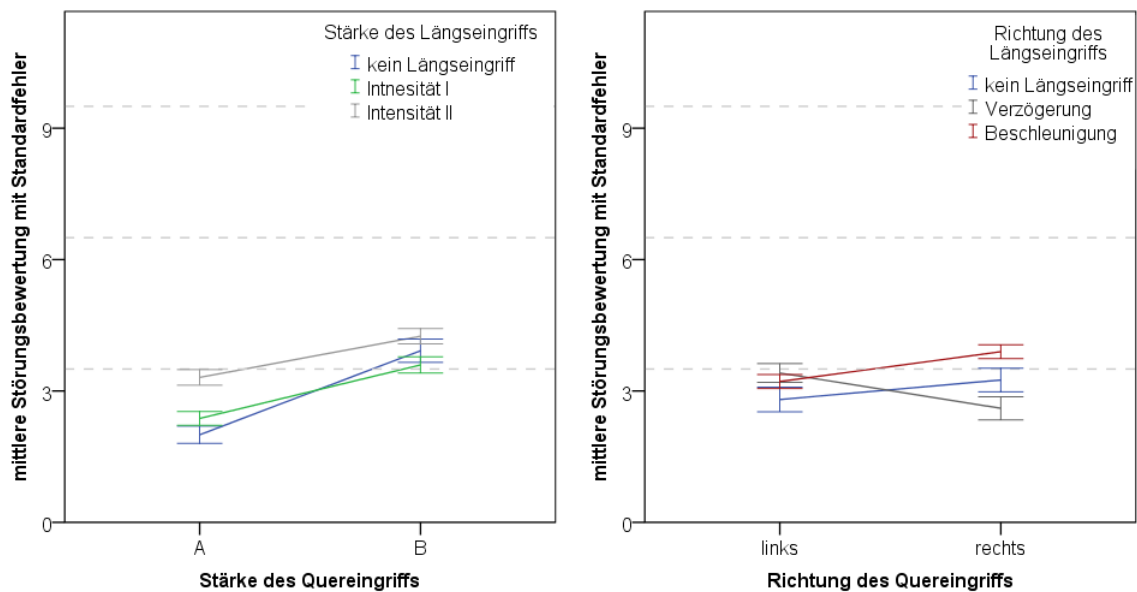


Abbildung 38a und b: Dargestellt sind die mittleren Störungsbewertungen des Fahrstreifenwechsels für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 38a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 38b).

Darüber hinaus wirken die Richtungen beider Komponenten ebenfalls wechselseitig auf die wahrgenommene Störung durch die Fehlerbilder (siehe Abbildung 38b). Werden Lenkeingriffe nach links bzw. in Richtung der Pylonen auf der linken Fahrbahn aufgeschaltet, ist es nahezu unerheblich, ob und welcher gleichzeitige Eingriff in die Querführung stattfindet. Allenfalls Eingriffe mit Verzögerungskomponente werden gegenüber einfachen Lenkeingriffen als geringfügig störender bewertet. Da sich hier jedoch nur tendenzielle Unterschiede zeigen ($p_{\text{Verzl-OI}} = .096$) und insgesamt ein sehr niedriges Störungsniveau vorliegt ($M_{\text{Verzl}} = 3.41$, $SD = 1.89$), kann dieser Unterschied vernachlässigt werden.

Werden Lenkeingriffe in Richtung der Fahrstreifenverengung und damit in Richtung des auszuführenden Lenkmanövers dargeboten (rechts), lässt sich ein verändertes Muster feststellen. Kombinationen mit Verzögerungskomponente entschärfen die Situation und wirken weniger störend als Verzögerungen mit lateraler Komponente nach rechts ($p_{\text{Verzl-Verzr}} = .023$). Für einfache Lenkeingriffe lassen sich überhaupt keine Änderungen in Abhängigkeit der Eingriffsrichtungen feststellen ($p_{\text{OI-Or}} = .268$), hier bestätigen sich

die in Kapitel 2.6.3 beschriebenen Befunde nach Schmidt (2009). Werden jedoch mit diesen Lenkeingriffen Beschleunigungen dargeboten, resultieren erhöhte Störungsbewertungen ($p_{\text{Beschl-Beschr}} = .003$). Durch den Vergleich der drei Eingriffsbilder mit lateraler Komponente nach rechts lässt sich dementsprechend feststellen, dass Kombinationen mit Beschleunigungen den beiden übrigen Eingriffen überlegen sind ($p_{\text{Beschr-Verzr}} < .001$; $p_{\text{Beschr-Or}} = .041$). Einfache Lenkeingriffe und Kombinationen mit Verzögerung setzen sich nur tendenziell voneinander ab ($p_{\text{Verzr-Or}} = .098$).

Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Störungsbewertungen des Fahrstreifenwechsels:

- Die Störungsbewertungen des Fahrstreifenwechsels liegen, wie die Bewertungen der übrigen Szenarien, auf einem niedrigen Niveau und verlassen den „störenden“ Bereich nicht.
- Alle variierten Eingriffscharakteristika werden in Form von Haupteffekten oder im Rahmen von Interaktionen wirksam. Es treten Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften beider Dimensionen auf, sodass eine gemeinsame Betrachtung beider Komponenten empfehlenswert ist.
- Intensivere Eingriffe in die Querführung wirken auch im Fahrstreifenwechsel-Szenario störender.
- Stärkere Eingriffe in die Fahrzeuglängsführung wirken ebenfalls störender als schwächere Eingriffe. Bei niedrigen Eingriffsintensitäten wirken positive Beschleunigungen störender als Verzögerungen.
- Werden Lenkmomente in Richtung der linken Pylonenbegrenzung aufgeschaltet, kann die longitudinale Komponente unter subjektiven Gesichtspunkten vernachlässigt werden. Es zeigen sich hier keine Unterschiede.
- Werden Lenkeingriffe nach rechts in Richtung der auszuführenden Lenkbewegung aufgeschaltet, entschärfen Verzögerungen die Situation geringfügig.
- Positive Beschleunigungen in Kombination mit Lenkeingriffen in Richtung der auszuführenden Lenkbewegung wirken störender und setzen sich von den übrigen Fehlerbildern ab. Für einfache Lenkeingriffe zeigen sich keine Richtungsabhängigkeiten.

Maximaler Lenkradwinkel

Die Auslenkungen, die Fahrer in der Folge der dargebotenen Fehlerbilder zulassen, werden im Wesentlichen von nur zwei Faktoren beeinflusst. Einerseits hat die Stärke, mit der in die Lenkung eingegriffen wird, deutliche Auswirkungen. Daneben spielt die longitudinale Eingriffsrichtung eine entscheidende Rolle, die nur in tendenzieller Wechselwirkung mit ihrer Intensität steht (siehe Tabelle 41). Wechselwirkungen zwischen den Eingriffsrichtungen können hier nicht festgestellt werden. Im Vergleich zu den oben dargestellten Ergebnissen der Engstelle treten erhöhte Auslenkungen auf.

Tabelle 41: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für den Betrag des maximalen Lenkradwinkels des Fahrstreifenwechsels ($df = 1$; Fehler $df = 362$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	8.55	.004
Richtung des Längseingriffs	-	-	8.53	.004
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	2.80	.095

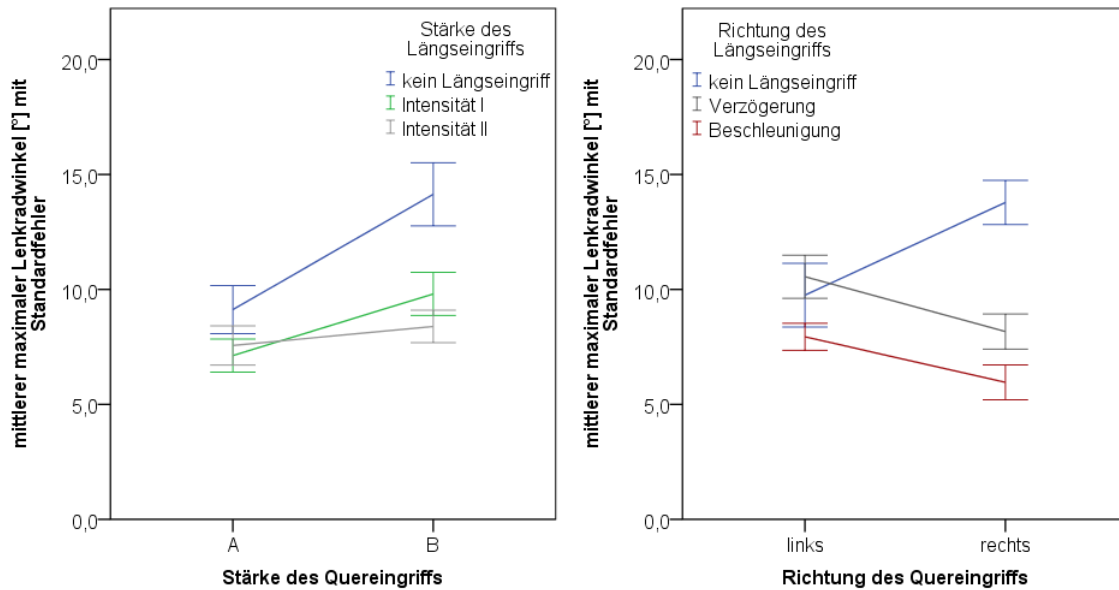


Abbildung 39a und b: Dargestellt sind die mittleren maximalen Lenkradwinkel [°] des Fahrstreifenwechsels für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 39a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 39b).

Für die Intensität des lateralen Eingriffs (siehe Abbildung 39a) zeigen sich größere Auswirkungen auf das Lenkgeschehen mit stärkeren Lenkmomenten ($p_{A-B} < .001$). Das Verhältnis der Auslenkungen, die Fahrer innerhalb des Fahrstreifenwechsel-Szenarios zulassen, entspricht damit dem Muster der subjektiven Störungsbewertungen. Die Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsrichtung zeigen, dass mit alleinigen Lenkeingriffen die größten Auslenkungen zugelassen werden ($M_0 = 11.63^\circ$, $SD = 7.79$). An zweiter Stelle folgen die maximalen Lenkradwinkel, die mit Verzögerungen zugelassen werden ($M_{Verz} = 9.70^\circ$, $SD = 7.39$). Eingriffskombinationen, die Beschleunigungskomponenten enthalten, gehen mit den geringsten maximalen Lenkradwinkeln einher, wobei hier erhebliche Streuungen auftreten ($M_{Besch} = 6.93^\circ$, $SD = 6.72$). Alle drei Eingriffsbilder setzten sich zudem signifikant voneinander ab ($p_{0-Verz} = .002$; $p_{0-Besch} < .001$; $p_{Verz-Besch} = .004$). Eine Analyse der Wechselwirkung zwischen Stärke und Richtung zeigt hierbei, dass sich der zugelassene Lenkradwinkel mit stärkeren Eingriffen noch weiter verringert, wenn positive Beschleunigungen vorliegen (siehe Anhang). Damit lässt sich erneut die laterale Richtungsabhängigkeit feststellen. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass auf Eingriffskombinationen, die potentiell störender sind (Beschleunigungen mit Lenkeingriffen in Richtung der auszuführenden Lenkbewegung), kompensatorisch reagiert wird.

Zusammenfassung der Ergebnisse zu den maximalen Lenkradwinkeln des Fahrstreifenwechsels:

- Im Vergleich zu den oben dargestellten maximalen Auslenkungen des Engstellen-Szenarios treten (deskriptiv) größere mittlere Lenkradwinkel auf.
- Die Auslenkungen, die Fahrer infolge der Eingriffe innerhalb eines Fahrstreifenwechsels zulassen, werden im Wesentlichen nur durch die Stärke, mit der in die Lenkung eingegriffen wird, und durch die longitudinale Eingriffsrichtung beeinflusst.
- Stärkere Lenkmomente gehen mit größeren Auslenkungen einher. Dieses Verhaltensmuster lässt sich anhand der subjektiv wahrgenommenen Störungen nachvollziehen.
- Störendere Eingriffskombinationen mit Beschleunigungskomponenten gehen mit den besten Begrenzungen einher und werden unter lateralen Gesichtspunkten gut beherrscht.
- Einfache Lenkeingriffe gehen im Vergleich zu Kombinationen mit Verzögerungen mit etwas größeren maximalen Auslenkungen einher. Da Verzögerungskomponenten grundsätzlich mit geringen Störungsbewertungen einhergehen, kann von einer problemlosen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ausgegangen werden.

Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels

Die lenkradbezogenen Reaktionszeiten⁵ unterliegen vergleichsweise vielen Einflüssen (siehe Tabelle 42) und zeigen zum Teil unerwartete Effekte. Grundsätzlich werden Eingriffe mit stärkeren lateralen Komponenten früher begrenzt als Kombinationen mit schwächeren Komponenten (siehe Abbildung 40a, $p_{A-B} = .028$). Damit zeigt sich, dass auf störendere Eingriffskomponenten, die zudem mit erhöhten Auslenkungen einhergehen, mit einer verbesserten Reaktionsgeschwindigkeit reagiert wird. Für den longitudinalen Bereich lässt sich dieses Muster so jedoch nicht zeigen.

Tabelle 42: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für den Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels [s] des Fahrstreifenwechsels (df = 1; Fehler df = 146).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	4.95	.028
Stärke des Längseingriffs	-	-	4.50	.036
Richtung des Quereingriffs	-	-	14.36	<.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	17.86	<.001

⁵ Aufgrund von technischen Problemen konnten hier nur die Daten von 169 Fällen berücksichtigt werden.

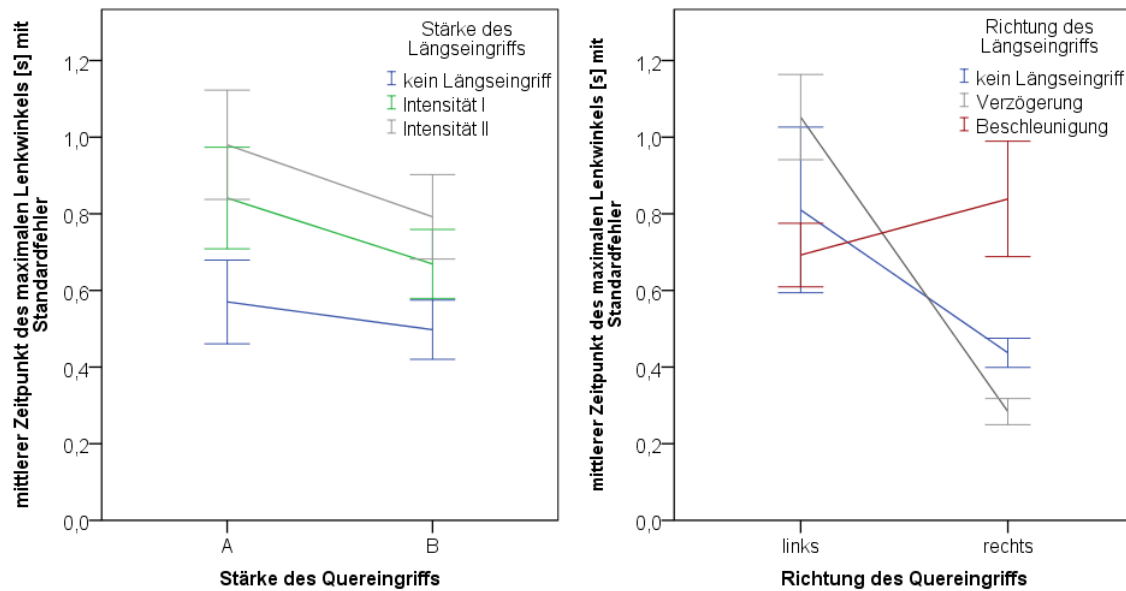


Abbildung 40a und b: Dargestellt sind die mittleren maximalen Lenkwinkel [°] des Fahrstreifenwechsels für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 40a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 40b).

Die schnellsten mittleren Reaktionszeiten zeigen sich für einfache Lenkeingriffe nach 530 ms (SD = 0.41) und für Kombinationen mit geringerer longitudinaler Intensität (MI = 720 ms, SD = 0.60). Beide Mittelwerte unterscheiden sich nicht ($p_{0-1} = .923$). Im Vergleich zu den aus der Literatur bekannten Werten sind diese Reaktionszeiten erhöht. Da alleinige Lenkeingriffe mit den größten Auslenkungen einhergehen, kann die schnelle Begrenzung als kompensatorische Handlung gesehen werden, die zudem die relativ geringen Störungsbewertungen erklärt. Unerwartet sind hier jedoch die relativ späten Reaktionszeiten für Kombinationen mit stärkeren Eingriffen in die Längsführung, die im Mittel nach 860 ms vorliegen. Da insgesamt relativ geringe maximale Auslenkungen mit diesen Eingriffen auftreten und zudem sehr moderate Störungsbewertungen vorliegen, sprechen diese Daten allerdings nicht für eine problematische Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Dennoch weisen diese vergleichsweisen langsamen Reaktionszeiten Parallelen zu den in Kapitel 4.3 geschilderten Reaktionen nach Übernahmeaufforderungen auf. Auch hier zeigten sich innerhalb der Einfahrt in eine Baustelle lenkradbezogene Reaktionszeiten von ca. 850 ms, die ebenfalls durch moderate Lenkwinkel-Extrema relativiert werden konnten.

Zudem zeigen weitere Aufschlüsselungen (siehe Abbildung 40b) nochmals erhöhte Reaktionszeiten. In dieser Darstellungsform kann gezeigt werden, dass die maximalen Lenkwinkel für Verzögerungen erst nach ca. 1 s auftreten und damit nochmals deutlich über den möglichen Reaktionszeiten liegen. Als Erklärung für diese Befunde kommen erneut die geringe subjektive Kritikalität und die relativ geringen Auslenkungen infrage. Demgegenüber stehen drastisch verringerte Reaktionszeiten, die im Mittel bereits nach 280 ms auftreten (SD = .14). Eine weitere Auffälligkeit bezieht sich auf die Reaktionszeiten bei Eingriffen mit Beschleunigungskomponente. Hierbei zeigt sich, dass diese grundsätzlich störenden Eingriffe nicht von verbesserten Reaktionszeiten begleitet werden. Obwohl hier kompensatorische Reaktionen zu erwarten gewesen wären, zeigen sich im Vergleich zu Beschleunigungen mit Lenkeingriffen nach links keine signifikanten Unterschiede ($p_{\text{Beschl-Beschr}} = .359$). Auch hier muss jedoch auf die geringen absoluten maximalen Auslenkungen von ca. 7° hingewiesen werden. Die

Reaktionszeiten für einfache Lenkeingriffe ordnen sich zwischen den verschiedenen Extrema an und werden schnell begrenzt, sofern die Lenkmomente in Richtung der auszuführenden Lenkbewegung gerichtet sind (440 ms). Insgesamt erweisen sich die Daten zur lenkungsbezogenen Reaktionszeit als relativ inkonsistent und entsprechen nur in Teilen dem oben beschriebenen Ergebnismuster. Neben den bereits diskutierten Ursachen kommt auch die oben angesprochene verringerte Datenbasis für dieses Ergebnismuster infrage. Darüber hinaus macht sich hier das Fehlen eines Pedalerie-bezogenen Maßes bemerkbar. Denkbar wären rasche Bremsreaktionen, die das gesamte Fahrstreifenwechsel-Szenario unmittelbar entschärfen.

Zusammenfassung der Ergebnisse zum Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels des Fahrstreifenwechsel-Szenarios:

- Stärkere laterale Komponenten werden früher begrenzt als schwächere Eingriffe in die Querführung. Da Komponenten dieser Art mit größeren Auslegungen einhergehen und zudem höhere Störungsbewertungen aufweisen, können diese Reaktionen als kompensatorische Handlungen verstanden werden.
- In Abhängigkeit der longitudinalen Komponente zeigen sich unerwartete Effekte, da für Eingriffskombinationen mit stärkeren Eingriffen in die Längsführung die spätesten Reaktionen festgestellt werden. Diese treten zudem erst nach 860 ms auf. Da Eingriffe dieser Art potentiell störender sind, wären hier kompensatorische Handlungen zu erwarten gewesen. Als Ursache für die verhältnismäßig späten Reaktionen kommen relativ geringe maximale Auslenkungen und geringe absolute Störungsbewertungen in Frage.
- Die Aufschlüsselung anhand der Eingriffsrichtungen wirft weitere Fragen auf, weil für Kombinationen mit Verzögerungen sowohl sehr langsame als auch sehr schnelle Reaktionen in Abhängigkeit der Richtung des Lenkeingriffs festgestellt wurden.
- Für die störenden Kombinationen mit Beschleunigungen und Eingriffen nach rechts können ebenfalls Reaktionszeiten von ca. 850 ms festgestellt werden. Im Vergleich zu weniger störenden Kombinationen lassen sich hier nur eingeschränkt verbesserte Reaktionszeiten und damit kompensatorische Handlungen zeigen.
- Die niedrigen Störungsbewertungen, die geringen Auslenkungen und das Fehlen eines direkten Maßes zur Beschreibung des Bremsverhaltens erschweren ein detailliertes Verständnis der lenkungsbezogenen Reaktionszeiten. Insgesamt liegen die Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels innerhalb eines akzeptablen Spektrums, jedoch ohne in die Bereiche der schnellstmöglichen Reaktion zu gelangen.

Spannweite der Gierrate

Die Veränderungen der Gierrate unterliegen erwartungsgemäß den Eigenschaften der lateralen Komponente. Darüber hinaus werden die resultierenden Fahrzeugreaktionen auch von Eigenschaften der longitudinalen Komponente beeinflusst (siehe Tabelle 43). Mit zunehmender lateraler Intensität zeigen sich größere Spannweiten der Gierrate. Wie in den übrigen Maßen lässt sich hier keine Beteiligung der longitudinalen Intensität feststellen. Die mittlere Spannweite für stärkere Eingriffe liegt mit 5.78 %/s (SD = 3.84) relativ hoch (Abbildung 41), sodass hier höhere Störungsbewertungen zu erwarten

gewesen wären. Dennoch fügt sich dieser Effekt in das generelle Muster der subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen.

Tabelle 43: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Gierate [°/s] des Fahrstreifenwechsel-Szenarios (df = 1; Fehler df = 362).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Quereingriffs	-	-	34.52	<.001
Richtung des Quereingriffs	-	-	14.23	<.001
Richtung des Quereingriffs * Richtung des Längseingriffs	Z	2	14.78	<.001

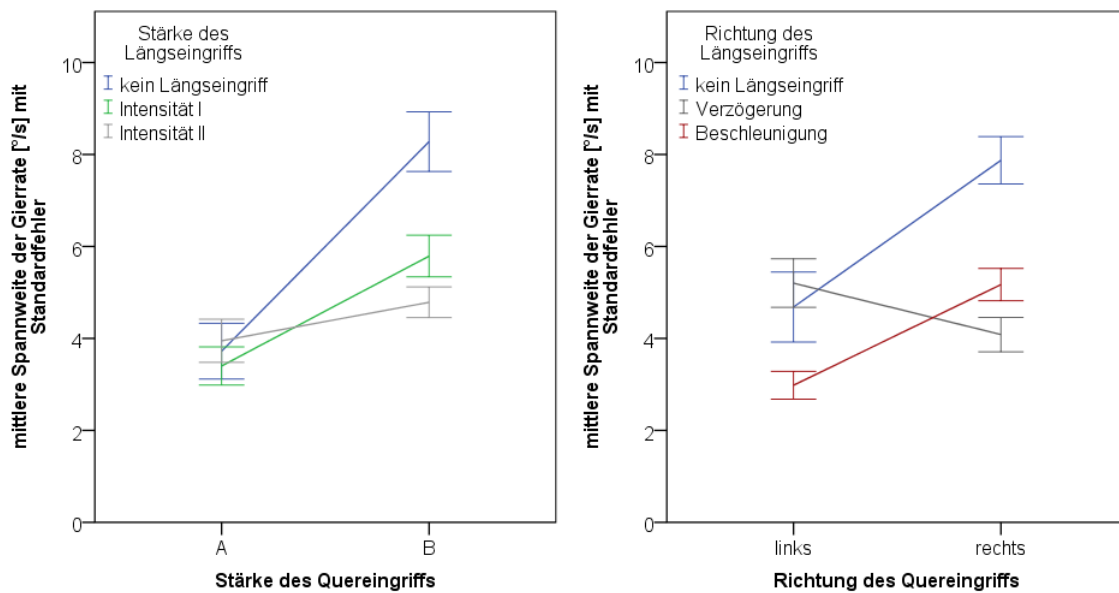


Abbildung 41a und b: Dargestellt sind die mittleren Spannweiten der Gierrate [°/s] des Fahrstreifenwechsels für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 41a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 41b).

Die Richtung der kombinierten Eingriffe zeigen sehr spezifische Auswirkungen, sodass hier erneut eine Wechselwirkung festgestellt werden kann. Das hier auftretende Muster entspricht im Wesentlichen dem Muster der Störungsbewertungen und dem der maximalen Lenkradwinkel. Während die Fahrzeugreaktionen bei Lenkeingriffen in Richtung der Pylonenbegrenzung relativ nahe beieinander liegen, treten in entgegengesetzter Richtung deutlich höhere Werte für Beschleunigungen und einfache Lenkeingriffe auf ($p_{\text{Beschl-Beschr}} < .001$; $p_{0\text{I-}0\text{r}} = .001$). Mit Verzögerungen lassen sich allenfalls tendenzielle Veränderungen beobachten ($p_{\text{Verzl-Verzr}} = .086$). In Bezug auf die subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen fallen hier zwei Besonderheiten auf. Zum einen treten die Fahrzeugreaktionen, wie auch die maximalen Lenkradwinkel, bei einfachen Lenkeingriffen deutlich hervor ($M_{0\text{r}} = 7.78$ °/s, $SD = 2.91$), ohne dass diese mit erhöhten Störungsbewertungen versehen werden. Zum anderen liegen im Bereich des Fahrstreifenwechsels auch für diese Aufschlüsselung relativ hohe Spannweiten vor, die sich ebenfalls nicht in den absoluten Störungsbewertungen niederschlagen. Das Szenario des Fahrstreifenwechsels erweist sich damit nicht als besonders sensibles Setting zur Untersuchung der Auswirkung teilautomatisierter Eingriffe.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Spannweite der Gierrate des Fahrstreifenwechsels:

- Innerhalb des Fahrstreifenwechsels treten vergleichsweise große Spannweiten der Gierrate auf, die jedoch nicht mit erhöhten Störungsbewertungen versehen werden. Eine erhöhte Sensitivität zur Untersuchung teilautomatisierter Eingriffe zeigt sich für dieses Szenario nicht.
- Das Ergebnismuster der Spannweite entspricht in weiten Teilen den Störungsbewertungen und insbesondere den Ergebnissen der maximalen Lenkradwinkel. Stärkere laterale Eingriffe gehen mit stärkeren Auswirkungen einher, ohne dass Effekte der longitudinalen Intensität festgestellt werden können.
- Einfache Lenkeingriffe gehen mit besonders großen Auswirkungen einher, werden im Vergleich zu den übrigen Fehlerbildern jedoch nicht als schwerwiegender bewertet.
- Werden innerhalb des Fahrstreifenwechsels Verzögerungen aufgeschaltet, ist es nahezu unerheblich ob gleichzeitig Lenkeingriffe entgegen oder in Richtung der auszuführenden Lenkbewegung aufgeschaltet werden. Die Fahrzeugreaktionen, das Lenkverhalten und die Störungsbewertungen bleiben hier auf vergleichbarem Niveau.

Spannweite der Längsbeschleunigung

Wie für das oben analysierte Szenario der Engstelle (siehe 5.2.3) werden die Veränderungen der Längsbeschleunigung nur durch Eigenschaften der longitudinalen Eingriffskomponente beeinflusst (siehe Tabelle 44). Die Stärke, mit der abgebremst oder beschleunigt wird, hat dabei einen deutlichen Einfluss (Abbildung 42a). Die größten Veränderungen treten mit intensiveren Eingriffen auf, die sich gegenüber schwächeren oder nicht vorhandenen Eingriffen deutlich absetzen. Ebenso unterscheiden sich Kombinationen mit schwächeren Eingriffen in die Längsführung von einfachen Lenkeingriffen. Dieser Aspekt zeigt sich hier nicht anhand der wahrgenommenen Auswirkungen, da zwischen den Störungsbewertungen der alleinigen Lenkeingriffe und denen der schwächeren Eingriffskombinationen kein Unterschied festgestellt werden konnte.

Tabelle 44: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Längsbeschleunigung [m/s^2] des Fahrstreifenwechsel-Szenarios ($df = 1$; Fehler $df = 362$).

	Art der Interaktion	Typ der Interaktion	F	p
Stärke des Längseingriffs	-	-	169.01	<.001
Stärke des Längseingriffs * Richtung des Längseingriffs	I	-	41.41	<.001

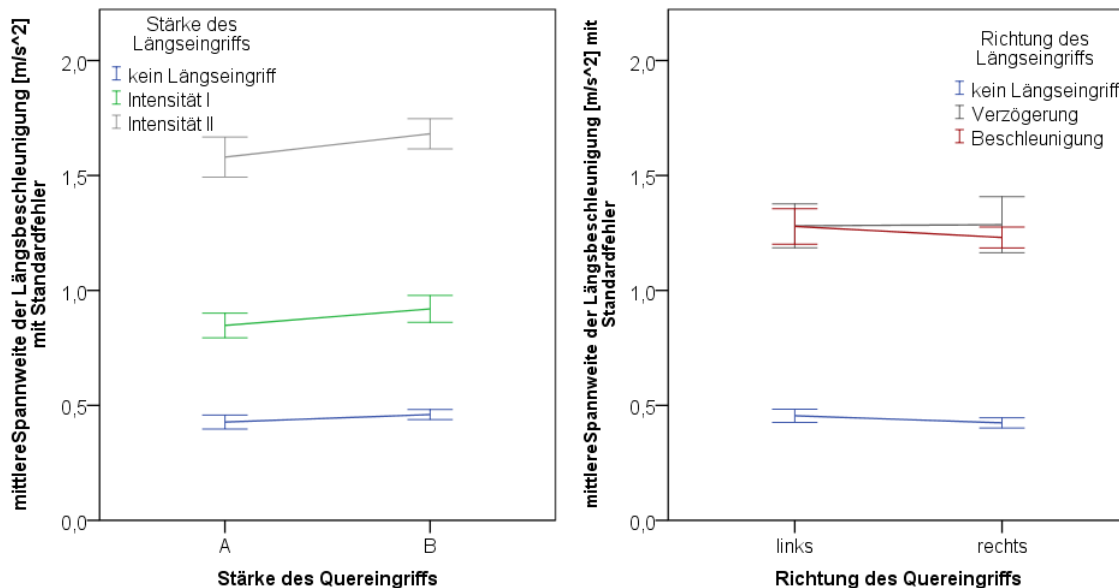


Abbildung 42a und b: Dargestellt sind die mittleren Spannweiten der Gierrate [$^{\circ}/s$] des Fahrstreifenwechsels für die jeweiligen Eingriffsstärken (Abbildung 42a) und Eingriffsrichtungen (Abbildung 42b).

Dennoch treten weitere Parallelen beider Maße auf, wobei sich die oben beschriebene Wechselwirkung zwischen Stärke und Intensität innerhalb der lateralen Komponente anhand der Längsbeschleunigung nachvollziehen lässt. Hierbei zeigt sich, dass schwächere Verzögerungen im Vergleich zu schwächeren Beschleunigungen als unangenehm erlebt werden. Liegen höhere Intensitäten vor, dreht sich dieses Verhältnis. Gleiches lässt sich anhand der Spannweiten der Längsbeschleunigung zeigen (siehe Anhang).

Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Spannweiten der Längsbeschleunigung für das Fahrstreifenwechsel-Szenario:

- Die resultierenden longitudinalen Fahrzeugreaktionen werden ausschließlich von den Eigenschaften der Längseingriffe beeinflusst. Eigenschaften der lateralen Komponente werden nicht durch den Fahrer vermittelt und damit nicht wirksam.
- Stärkere Eingriffe führen zu stärkeren Reaktionen. Dieses Verhältnis lässt sich anhand der Störungsbewertungen nicht nachvollziehen. Die subjektiv erlebten Auswirkungen von einfachen Lenkeingriffen konnten nicht von den Auswirkungen schwächerer Kombinationen unterschieden werden.
- Dennoch zeigen sich deutliche Parallelen zwischen beiden Maßen, indem sich die Bewertungsmuster der longitudinalen Komponente anhand der Längsbeschleunigung nachvollziehen lassen. Hierbei zeigt sich, dass erst mit größeren Spannweiten Verzögerungen im Vergleich zu Beschleunigungen als unangenehmer erlebt werden.

5.2.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Fahrstreifenwechsel

Das Szenario des Fahrstreifenwechsels zeichnet sich nicht durch eine erhöhte Sensitivität aus. Die verwendeten Fehlerbilder gehen nicht mit erhöhten Störungsbewertungen oder außergewöhnlichen Verhaltensmustern einher. Alle Eingriffe lassen sich auch innerhalb des Fahrstreifenwechsels problemlos beherrschen. Dennoch zeigen sich verschiedene unerwartete Aspekte. Die Störungsbewertungen liegen

insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau, nur Beschleunigungen in Kombination mit Lenkeingriffen in Richtung der auszuführenden Lenkbewegung bzw. in Richtung des zu erreichenden Fahrstreifens setzen sich geringfügig ab. Werden diesen Bewertungen die Fahrer- und Fahrzeugreaktionen gegenübergestellt, wären hier jedoch stärkere subjektive Auswirkungen und ein andere inhaltliche Muster zu erwarten gewesen. Mit einfachen Lenkeingriffen treten deutlich erhöhte maximale Auslenkungen auf, die zumindest auf deskriptivem Niveau auch den Werten der Engstelle und der Geradeausfahrt überlegen sind. Darüber hinaus treten für diese Eingriffsbilder sehr starke Gierreaktionen auf, obwohl die Lenkeingriffe sehr schnell begrenzt werden. Insgesamt wären hier deutlich stärkere Störungen zu erwarten, die sich zudem von den Bewertungen der übrigen Eingriffsbilder unterscheiden sollten. Weiterhin konnten innerhalb des in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Baustellenszenarios relativ hohe Bewertungen aufgezeigt werden. Als Erklärung für die dennoch relativ niedrigen Bewertungen kommen die von Schmidt (2009) herangezogenen Zusammenhänge der Signalentdeckungstheorie infrage. Hierbei werden relativ geringe Störungsbewertungen von Lenkeingriffen innerhalb eines doppelten Fahrstreifenwechselmanövers auf die ohnehin auszuführende Lenkaktivität zurückgeführt. Zusätzliche Lenkmomente könnten hier schlechter zu differenzieren sein. Eine weitere mögliche Erklärung kann in einer schnellen und einfachen Reaktion des Fahrers bestehen. Der Fahrer könnte durch das auszuführende Fahrmanöver bereits so stark in die Regelungsaufgabe eingebunden sein, dass Störungen sofort bemerkt und kompensiert werden können. Insbesondere dann, wenn diese Störungen gegenüber der eigenen Lenkaktivität relativ gering ausfallen.

Ein weiterer Grund für die niedrigen Bewertungen der einfachen Lenkeingriffe kann zudem in den fehlenden longitudinalen Komponenten gesehen werden. Welchen Einfluss Brems- bzw. positive Beschleunigungseingriffe haben können, zeigt sich besonders gut an den Ergebnissen der Längsbeschleunigung. Zum einen scheinen sich größere Veränderungen der Längsbeschleunigung direkt in den Störungsbewertungen zu manifestieren. Zum anderen lassen sich die Auswirkung der Richtung offenbar direkt in den Störungsbewertungen wiederfinden. Für das Ausmaß der empfundenen Störung und die auftretenden Spannweiten der Längsbeschleunigung konnten in Abhängigkeit der Richtung und Stärke identische Wirkmuster festgestellt werden. Darüber hinaus können Verzögerungen die wahrgenommene Auswirkung eines Fehlerbildes reduzieren. Eine Zusammenfassung der auftretenden Wechselwirkungen zeigt zudem, dass in den verschiedenen Maßen weiterhin Abhängigkeiten zwischen den Dimensionen bestehen, die sich auf die Richtungen beziehen (siehe Tabelle 44).

Tabelle 45: Zusammenfassung der vorliegenden Wechselwirkungen für die untersuchten Maße innerhalb des Fahrstreifenwechsels.

	Störungs- bewertungen	maximaler Lenkrad- winkel	Zeitpunkt des maximalen Lenkrad- winkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbe- schleunigung
Übergreifende Interaktion zwischen den Eingriffs- komponenten	Typ 2 (Richtung)		Typ 2 (Richtung)	Typ 2 (Richtung)	
Interaktion von Stärke und Richtung innerhalb Komponenten	Längseingriff	Längseingriff			Längseingriff

Zusammenfassend zeigt sich, dass innerhalb des Fahrstreifenwechsels sehr moderate Verhaltensweisen auftreten, wenngleich sich die lenkungsbezogenen Reaktionszeiten nicht so gut wie in den übrigen Szenarien in das Gesamtbild fügen.

5.2.4.2 Zusammenhänge zwischen subjektiven Störungsbewertungen und resultierenden Fahrzeugreaktionen des Fahrstreifenwechsel-Szenarios

Im Unterschied zum Szenario der Engstelle ergibt sich für den Fahrstreifenwechsel erneut ein eher heterogenes Bild der wirkenden Faktoren (siehe Tabelle 46). Die Stärke des Quereingriffs zeigt sich als konstantester Einflussfaktor und wird, abgesehen von der Spannweite der Längsbeschleunigung, in allen Maßen wirksam. Als einzige übergreifende Wechselwirkung tritt zudem erneut die Interaktion zwischen den Eingriffsrichtungen auf. Zusätzliche übergreifende Interaktionen lassen sich nicht feststellen. Diese Tatsache unterstreicht die Forderung, zumindest die Eingriffsrichtungen von Längs- und Quereingriffen in Folgeuntersuchungen gemeinsam zu variieren. Auf Basis der vorliegenden Daten lässt sich dieses Vorgehen nicht für die Eingriffsintensitäten fordern. Auf eine gemeinsame Betrachtung von Stärke und Intensität sollte jedoch auch hier nicht verzichtet werden, da zumindest innerhalb der longitudinalen Komponente Wechselwirkungen auftreten können. Auch hier ist erkennbar, dass automatische Eingriffe in die Längsführung Auswirkungen auf das Lenkverhalten haben können. Ebenfalls lässt sich feststellen, dass die Wahrnehmung des Fahrers den stärksten Einflüssen unterliegt, während die lenkradbezogenen Verhaltensaspekte nur in Teilen beeinflusst werden.

Tabelle 46: Die Tabelle führt die abhängigen Variablen und die Wirkfaktoren, einschließlich der möglichen Wechselwirkungen, für den Fahrstreifenwechsel auf. Es zeigt sich erneut ein heterogenes Bild. Den konstantesten Effekt hat die Intensität der Querführung, die in nahezu allen Maßen nachvollzogen werden kann.

Faktor / Faktorenkombination	Art des Effekts	Störungsbewertungen	Maximaler Lenkradwinkel	Zeitpunkt des max. Lenkradwinkels	Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbeschleunigung
Stärke des Längseingriffs	-	x		x		x
Stärke des Quereingriffs	-	x	x	x	x	
Richtung des Quereingriffs	-			x	x	
Richtung des Längseingriffs	-	x	x			
Stärke des Längseingriffs *	I	x	x			x
Richtung des Längseingriffs						
Richtung des Quereingriffs *	Z (Typ 2)	x		x	x	
Richtung des Längseingriffs						

Inwieweit die Störungsbewertungen mit den einzelnen Maßen zusammenfallen, ist in Tabelle 47 dargestellt. Für die alleinigen Lenkeingriffe zeigen sich wiederholt äußerst geringe Zusammenhänge zwischen den Störungsbewertungen und den Kennwerten der Gierrate ($r = .385$). Darüber hinaus tritt zwar ein signifikanter, aber dennoch vergleichbar geringer Zusammenhang zu den zugelassenen Auslenkungen auf. Weitere Zusammenhänge können nicht festgestellt werden.

Tabelle 47: Korrelative Zusammenhänge zwischen den subjektiven Störungsbewertungen, den erhobenen Verhaltensmaßen und den Veränderungsmaßen des Fahrstreifenwechsels. Die Angabe der Korrelation erfolgt getrennt für alleinige Lenkeingriffe und vollständige Eingriffskombinationen.

		Störungsbewertungen für alleinige Lenkeingriffe	Störungsbewertungen für kombinierte Eingriffe
Maximaler Lenkradwinkel	Korrelation	.388	-.023
	Signifikanz	.001	.688
	N	74	319
Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels	Korrelation	.218	.091
	Signifikanz	.062	.103
	N	74	320
Spannweite der Gierrate (Kategorien)	Korrelation	.365	.092
	Signifikanz	.040	.526
	N	32	200
Spannweite der Längsbeschleunigung (Kategorien)	Korrelation	.104	.344
	Signifikanz	.390	<.001
	N	70	266

Für die Eingriffskombinationen lassen sich die oben beschriebenen Zusammenhänge überhaupt nicht mehr nachweisen. Auf signifikantem Niveau zeigen sich nur Zusammenhänge zur Spannweite der Längsbeschleunigung. Da diese Zusammenhänge jedoch ebenfalls sehr gering sind ($r = .344$), können Einflüsse der Längsbeschleunigung mit starken Einschränkungen angenommen werden.

5.3 Vergleich der Auswirkungen von Beschleunigungskombinationen in den untersuchten Fahrszenarien

Da der bisherige Analyseansatz keinen direkten Vergleich der verschiedenen Szenarien erlaubt, soll die Sensitivität der unterschiedlichen Prüfsituationen im Folgenden genauer untersucht werden. Hierzu werden Eingriffskombinationen mit positiven Beschleunigungen verwendet. Obwohl sich für Beschleunigungskombinationen keine problematischen Aspekte der Beherrschbarkeit gezeigt haben, setzen sich diese Fehlerbilder dennoch wiederholt von den übrigen Eingriffen ab. Insbesondere Beschleunigungen mit stärkeren Lenkeingriffen nach rechts bzw. in Richtung des Kurvenäußeren sind innerhalb der Störungsbewertungsskala mit den höchsten Bewertungen versehen worden. Innerhalb der einfachen Geradeausfahrt und der Engstellen können diese lateralen Richtungsbezüge nur eingeschränkt erklärt werden. Während für die Geradeausfahrt bauliche Gründe in Form einer nahen Begrenzung infrage kommen, können diese Gründe nicht für die Engstelle herangezogen werden. Aufgrund der beidseitigen Pylonenbegrenzung sollte hier für Eingriffe in beide Richtungen ein einheitlicher Bezugsrahmen geschaffen sein. Obwohl die tatsächliche Ursache damit nicht geklärt werden kann, treten die erhöhten Störungsbewertungen dennoch auf und weisen damit auf die Relevanz dieses Fehlerbildes hin.

Überdies konnte gezeigt werden, dass die Intensität der Längsbeschleunigung einen Einfluss auf das Erleben und Verhalten haben kann. Mit geringeren positiven longitudinalen Intensitäten wirken stärkere Lenkeingriffe häufig weniger störend, während schwächere Verzögerungen geringere nivellierende Auswirkungen haben können. Um den Verlauf und die Rolle der longitudinalen Intensität innerhalb der verschiedenen Szenarien nachvollziehen zu können, sollten schwächere Beschleunigungseingriffe ebenfalls berücksichtigt werden.

Um den Einfluss des Fahrszenarios und die Auswirkungen zunehmend positiver Beschleunigungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu untersuchen, werden im Folgenden die Daten der Realfahrstudie einer erneuten Analyse unterzogen. Dabei werden ausschließlich Kombinationen berücksichtigt, die aus positiven Beschleunigungen (Intensität I und II) und stärkeren Lenkeingriffen (Intensität „B“) nach rechts bestehen. Diese beiden Fehlerbilder werden in allen Fahrszenarien gegenübergestellt und im Rahmen einer multivariaten Varianzanalyse analysiert. Als abhängige Variablen werden die unter 5.1.3 beschriebene Maße verwendet.

Auf globaler Ebene zeigen sich Effekte des Fahrszenarios und der longitudinalen Intensität. Eine Wechselwirkung beider Einflussgrößen kann nicht festgestellt werden (siehe Tabelle 48).

Tabelle 48: Ergebnisse der multivariaten Tests für das Fahrscenario und die Intensität der Längseingriffe.

	df	Fehler df	F	p
Fahrscenario	15	537	23.08	<.001
Stärke des Längseingriffs *	5	177	5.766	<.001
Fahrscenario * Stärke des Längseingriffs	15	537	.659	.759

Störungsbewertungen

Für den Vergleich der Störungsbewertungen zeigt sich, dass beide Faktoren (siehe Tabelle 49) die wahrgenommene Auswirkung der Beschleunigungskombinationen beeinflussen. Stärkere Beschleunigungen ($M_{II} = 4,74$, $SD = 1,55$) wirken störender als schwächere Eingriffe ($M_I = 4,07$, $SD = 1,65$), obwohl sich beide Eingriffsintensitäten nicht durch verschiedene Kategorien der Skala unterscheiden lassen (siehe Abbildung 43).

Tabelle 49: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Störungsbewertungen der Realfahrtstudie.

	Df	Fehler df	F	p
Fahrscenario	3	181	3.94	.009
Stärke des Längseingriffs *	1	181	6.00	.015
Fahrscenario * Stärke des Längseingriffs	3	181	.15	.925

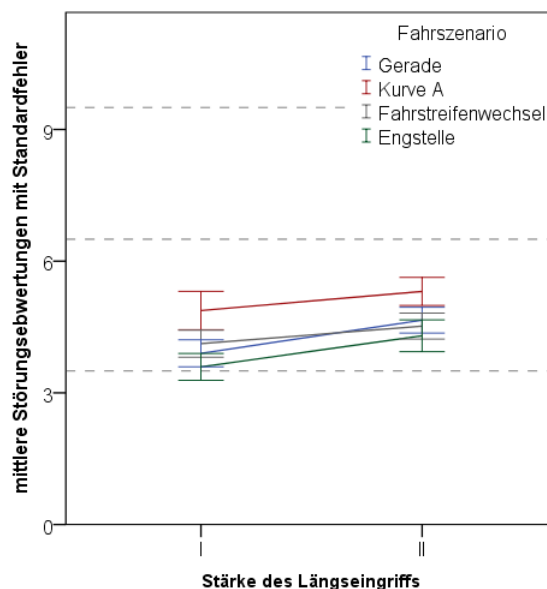


Abbildung 43: Darstellung der Störungsbewertungen in Abhängigkeit der Fahrscenarien und der Intensität der Beschleunigungseingriffe aus der Realfahrtstudie.

Für die verschiedenen Fahrscenarien zeigt sich im Hinblick auf die Sensitivität die klare Überlegenheit der Kurvensituation. Die mittleren Bewertungen des Kurvenszenarios ($M_K = 5,16$, $SD = 1,72$) unterscheiden sich auf signifikantem Niveau von allen übrigen Szenarien ($p_{K-G} = .016$, $p_{K-E} = .001$, $p_{K-F} = .021$). Für Eingriffskombinationen mit Beschleunigungskomponente erweist sich dieses Szenario als

sensitivste Fahrsituation. Im Übrigen besteht in subjektiver Hinsicht kein Unterschied zwischen den weiteren Szenarien. Die paarweisen Vergleiche dieser Szenarien weisen keinen Unterschied auf. Eingriffskombinationen mit Beschleunigungskomponenten haben damit innerhalb der Geradeausfahrt, der Engstelle und innerhalb des Fahrstreifenwechsels vergleichbare Auswirkungen auf das Erleben.

Maximaler Lenkradwinkel

Die Auslenkungen, die infolge der Kombinationen zugelassen werden, sind für schwächere oder stärkere positive Beschleunigungen nicht unterschiedlich (siehe Tabelle 50). Jedoch zeigen sich starke Unterschiede in Abhängigkeit des Szenarios. Auch hier setzt sich die Kurve ($M_K = 18,91^\circ$, $SD = 4,13$) deutlich von allen anderen Szenarien ab ($p_{K-G} < .001$, $p_{K-E} < .001$, $p_{K-F} < .001$), während sich keine Unterschiede zwischen den übrigen Szenarien finden lassen. Die erhöhten Störungsbewertungen des Kurvenszenarios lassen sich damit anhand des maximalen Lenkradwinkels deutlich nachvollziehen.

Tabelle 50: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für den maximalen Lenkradwinkel [$^\circ$] der Realfahrtstudie.

	df	Fehler df	F	p
Fahrszenario	3	181	59.95	<.001
Stärke des Längseingriffs *	1	181	1.60	.207
Fahrszenario *				
Stärke des Längseingriffs	3	181	1.58	.221

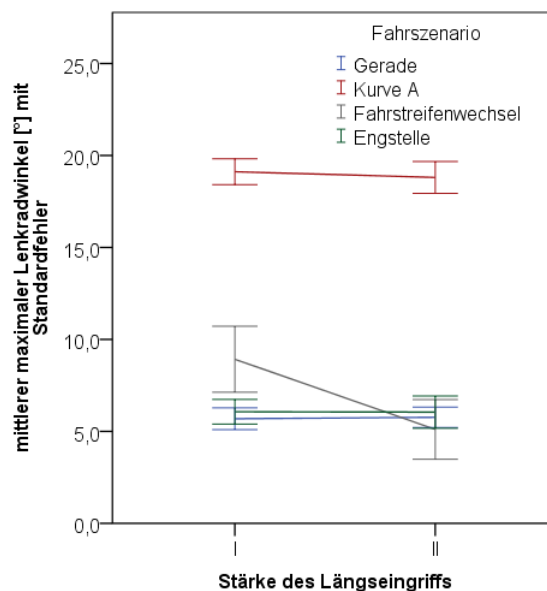


Abbildung 44: Darstellung der maximalen Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Fahrszenarien und der Intensität der Beschleunigungseingriffe aus der Realfahrtstudie.

Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels

Die Zeit, die vergeht, bis die Lenkeingriffe begrenzt werden, unterscheiden sich in Abhängigkeit des Fahrszenarios und ebenfalls in Abhängigkeit der Eingriffsintensität (siehe Tabelle 51). Aufgrund der nicht signifikanten Wechselwirkung auf globaler Ebene und der nur tendenziell signifikanten multivariaten

Testung werden hierbei nur die Haupteffekte interpretiert. Für die Fahrscenarien treten innerhalb dieses Maßes erstmals Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien auf. Die Reaktionszeiten in der Engstelle ($M_E = 0.58$ s, $SD = 0.65$) und innerhalb des Fahrstreifenwechsels ($M_F = 0.62$ s, $SD = 0.64$) sind gegenüber den übrigen Szenarien signifikant erhöht ($p_{E-G} = .045$, $p_{E-K} = .026$; $p_{F-G} = .004$, $p_{F-K} = .002$). Unterschiede zwischen beiden Szenarien lassen sich hingegen nicht feststellen ($p_{E-F} = .495$). Damit zeigen sich auf dieser Betrachtungsebene erneut geringere Auslenkungen, die jedoch spät begrenzt und insgesamt als störend beschrieben werden. Die Reaktionszeiten des Kurvenszenarios ($M_K = 0.31$ s, $SD = 0.24$) sind dabei gewohnt niedrig und sprechen weiterhin für angemessene Fahrreaktionen.

Tabelle 51: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für den Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels [°] der Realfahrtstudie.

	df	Fehler df	F	p
Fahrscenario	3	99	4.69	.004
Stärke des Längseingriffs *	1	99	6.77	.011
Fahrscenario * Stärke des Längseingriffs	3	99	2.42	.070

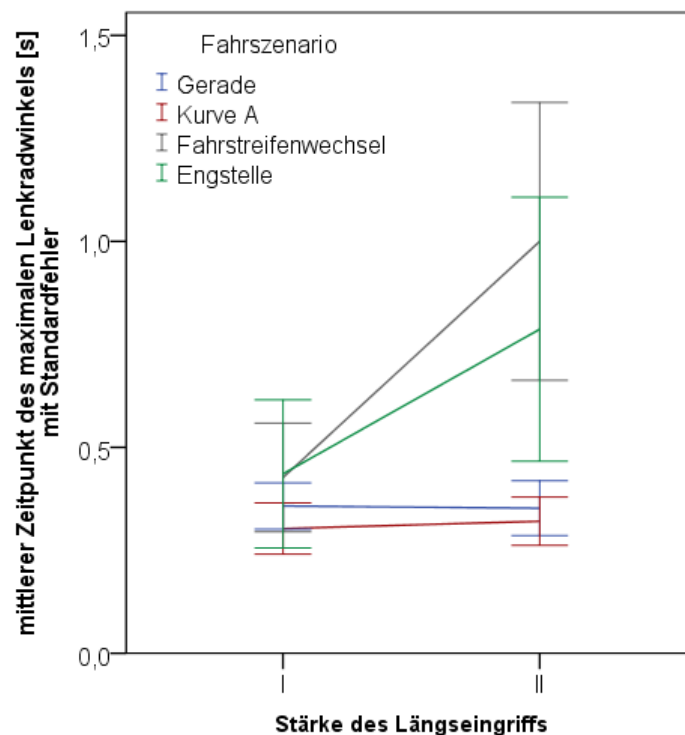


Abbildung 45: Darstellung der Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels in Abhängigkeit der Fahrscenarien und der Beschleunigungsintensität.

Da sich die Intensität der longitudinalen Komponente in den lenkungsbezogenen Reaktionszeiten niederschlägt, lassen sich Einflüsse der Beschleunigungskomponenten anhand primär lateraler Verhaltensmaße nachvollziehen. Dabei verlängert sich die Reaktionszeit mit stärkeren positiven Beschleunigungen erheblich. Treten die Zeitpunkte des maximalen Lenkradwinkels mit schwächeren Beschleunigungen (Intensität I) noch nach ca. 380 ms auf, werden Lenkeingriffe, die in Kombination mit stärkeren Beschleunigungen dargeboten werden (Intensität II), erst nach ca. 620 ms begrenzt. Obwohl

dieser Effekt aufgrund der inhaltlichen Ergebnismuster nicht als problematisch für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion angesehen werden muss, handelt es sich hierbei grundsätzlich um ein unerwünschtes Ergebnis.

Spannweite der Gierrate

Anhand der Gierrate lassen sich keine Einflüsse der longitudinalen Komponente, wohl aber deutliche Auswirkungen des Fahr Szenarios feststellen (siehe Tabelle 52). Die Veränderungen, denen die Gierrate unterliegt, sind dabei innerhalb des Fahrstreifenwechsels besonders deutlich ($M_F = 5.85, SD = 3.60$) und liegen weit über den Mittelwerten der übrigen Szenarien ($p_{F-G} < .001$, $p_{F-K} < .001$, $p_{F-E} < .001$). Weitere Unterschiede zwischen den Szenarien treten hier nicht auf.

Tabelle 52: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Gierrate [°/s] der Realfahrtstudie.

	df	Fehler df	F	p
Fahr Szenario	3	181	28.64	<.001
Stärke des Längseingriffs *	1	181	.13	.713
Fahr Szenario *				
Stärke des Längseingriffs	3	181	.46	.713

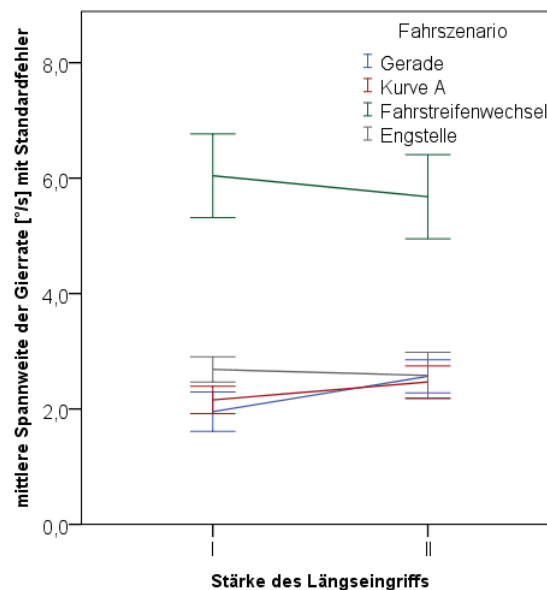


Abbildung 46: Darstellung der Spannweite der Gierrate [°/s] in Abhängigkeit der Fahr Szenarien und der Intensität der Beschleunigungseingriffe aus der Realfahrtstudie.

Aufgrund der großen Spannweiten wären deutlich höhere Störungsbewertungen zu erwarten. Demnach können durch das Manöver des Fahrstreifenwechsels zwar deutlich erhöhte Spannweiten der Gierrate erzeugt werden, die sich aber vermutlich aufgrund der hohen Eigendynamik des Fahrmanövers nicht in erhöhten Störungsbewertungen niederschlagen. Eine besondere Sensitivität ist somit auch im direkten Vergleich der verschiedenen Szenarien nicht erkennbar.

Spannweite der Längsbeschleunigung

Für die Spannweite der Längsbeschleunigung zeigen sich erwartungsgemäß die Auswirkungen von intensiveren Eingriffen in die Längsbeschleunigung (siehe Tabelle 53). Mit stärkeren Eingriffen treten größere Spannweiten auf ($M_{II} = 1.41$, $SD = 0.35$). Auswirkungen des Fahr Szenarios zeigen sich hingegen nicht

Tabelle 53: Ergebnisse der Zwischensubjekttests für die Spannweite der Längsbeschleunigung [m/s^2] der Realfahrtstudie.

	df	Fehler df	F	p
Fahr Szenario	3	181	.31	.817
Stärke des Längseingriffs *	1	181	22.38	<.001
Fahr Szenario *	3	181	1.02	.386
Stärke des Längseingriffs	3	181	1.02	.386

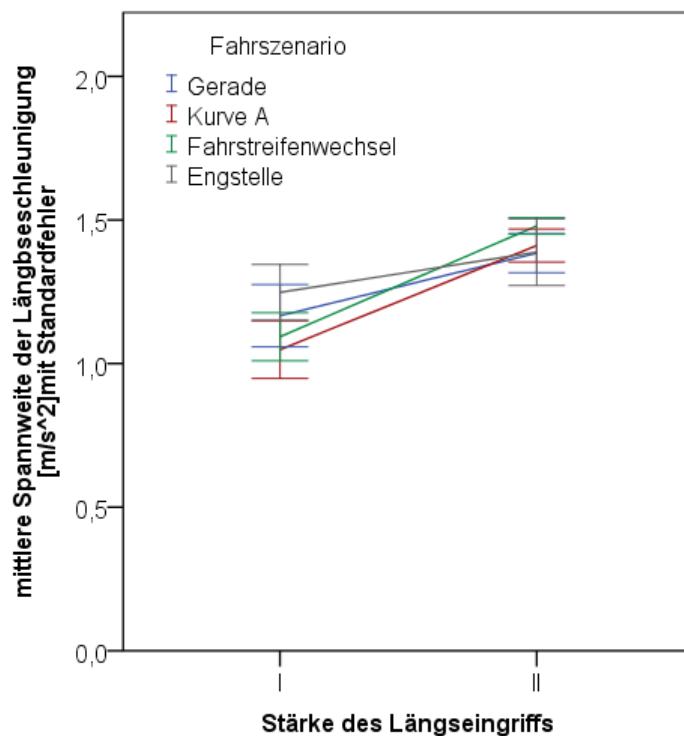


Abbildung 47: Darstellung der Spannweite der Längsbeschleunigung [m/s^2] in Abhängigkeit der Fahr Szenarien und der Intensität der Beschleunigungseingriffe aus der Realfahrtstudie.

Anhand der Längsbeschleunigung lassen sich mit diesen Daten zwar die erhöhten Bewertungen der intensiveren Eingriffe, nicht aber die erhöhten Bewertungen des Kurvenszenarios nachvollziehen. Die resultierenden Fahrzeugreaktionen in der Längsführung ähneln sich zu stark, als dass hier systematische Unterschiede und damit die für die Störungsbewertung gefundenen Zusammenhänge festgestellt werden können.

5.3.1 Fazit zum Vergleich der Auswirkungen von Fahr Szenario und Beschleunigungsintensität

Der Vergleich der Ergebnismuster für die verschiedenen Fahr Szenarien zeigt eine besondere Sensitivität des Kurvenszenarios für die Bewertung der untersuchten Beschleunigungskombinationen. Die

besonderen Auswirkungen von Lenkeingriffen nach rechts (bzw. in Richtung des Kurvenäußeren) mit gleichzeitigen Beschleunigungen des Fahrzeugs lassen sich besonders gut anhand der subjektiven Effekte als auch anhand verschiedener Verhaltensparameter feststellen. Beherrschbarkeitsprobleme können hier jedoch nicht festgestellt werden. Da Kombinationen dieser Art insgesamt als „Worst-Case“-Eingriffsmuster teilautomatisierter Systeme angesehen werden müssen, können die hier gewonnenen Erkenntnisse auch auf die übrigen Fehlerbilder bezogen werden. Einerseits zeigen die mittleren subjektiven Bewertungen deutlich, dass sämtliche Beschleunigungskombinationen zwar als „störend“, nicht aber als „gefährlich“ wahrgenommen werden. Da die Störungsbewertungen als Schlüsselgröße des Bewertungsvorgangs betrachtet werden können, kann grundsätzlich von einer problemlosen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ausgegangen werden. Andererseits existieren auf der Verhaltensebene zwar einzelne Ergebnismuster, die auf die besonderen Anforderungen der Kurvensituation hinweisen (z. B. die stark vergrößerten zugelassenen Auslenkungen). Daneben lassen sich jedoch ebenso Reaktionen finden, die auf eine angemessene Reaktion der Fahrer hinweisen und kompensatorische Handlungen zeigen. Als Beispiel können hier die sehr schnellen lenkungsbezogenen Reaktionszeiten der Fahrer herangezogen werden.

Eine weitere Besonderheit zeigt sich für das Szenario des Fahrstreifenwechsels. Die hier auftretenden Gierreaktionen liegen deutlich über denen der übrigen Szenarien, schlagen sich aber nicht in den wahrgenommenen Auswirkungen nieder. Als Ursache wird die hohe Eigendynamik bzw. die eigene Lenkaktivität des Fahrers innerhalb dieses Manövers angenommen (Schmidt, 2009).

Höhere Intensitäten der Beschleunigungen schlagen sich deutlich in den Störungsbewertungen nieder, scheinen aber im Hinblick auf das Fahrszenario von untergeordneter Rolle zu sein. Die Auswirkungen stärkerer Beschleunigungen lassen sich zwar anhand der Intensitätsstufen nachvollziehen, jedoch ohne dass sich die Muster der Spannweiten in den übrigen Verhaltensmaßen wiederfinden. Zusätzlich lassen sich keine Wechselwirkungen zwischen Szenario und Intensität aufzeigen. Als besonderer Befund der Intensität bleiben dennoch die Muster der lenkungsbezogenen Reaktionszeiten zu nennen. Obwohl keine signifikante Wechselwirkung festgestellt werden konnte, liegt die Vermutung nahe, dass stärkere Beschleunigungen innerhalb der Engstelle und des Fahrstreifenwechsels zu verspäteten Reaktionen führen können.

6 Zusammenhänge zwischen resultierenden Fahrzeugreaktionen und Störungsbewertungen

In den vorherigen Analysen wurden Kennwerte der Gierrate und der Längsbeschleunigung als Maße der resultierenden Fahrzeugreaktion untersucht. Die Berücksichtigung dieser Maße erfolgt, um die subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen mit fahrzeugunabhängigen Parametern und Grenzwerten in Zusammenhang bringen zu können. Für den Bereich der lateralen Eingriffe hat sich hierbei die Spannweite der Gierrate als besonders vorhersagekräftiger Prädiktor erwiesen (vgl. Kapitel 2.6.3.3). Für den Bereich der Längsführung wird hierzu analog die Längsbeschleunigung bzw. deren Spannweite betrachtet (vgl. Kapitel 2.6.2). Die Betrachtung der jeweiligen Spannweiten erfolgt, da in Anlehnung an Schmidt (2009) davon ausgegangen wird, dass sich menschliche Wahrnehmungszusammenhänge besser durch Veränderungen bzw. Veränderungsmaße als durch das bloße Niveau eingehender Reize beschreiben lassen.

Um die Beteiligung beider Größen an dem Zustandekommen der subjektiven Wahrnehmungsmuster zu untersuchen, wurden die Daten anhand einer multiplen Regression untersucht. Als Kriterium diente die subjektive Störungsbewertung, als Prädiktoren gingen die Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung in die Analyse ein. Von beiden Kennwerten wurde der Betrag verwendet. Gegenstand der Analyse waren ausschließlich die Daten der kombinierten Eingriffe und nicht die Datenpaare der alleinigen Lenkeingriffe.

Im Unterschied zu den vorangegangenen Korrelationen, die im Anschluss an die varianzanalytische Untersuchung vorgenommen wurden (siehe Kapitel 5.2), werden hier nicht die Rohdaten sondern die Mittelwerte der Störungsbewertungen, der Spannweite der Gierrate und der Spannweite der Längsbeschleunigung für die 16 unterschiedlichen Eingriffskombinationen in Beziehung gesetzt (siehe Abbildung 48).

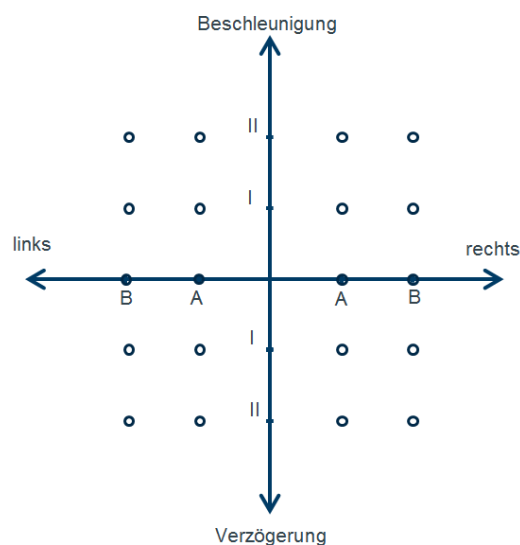


Abbildung 48: Darstellung des verwendeten Eingriffsschemas als Grundlage der Kategorien zu Berechnung der mittleren Spannweiten von Gierrate und Längsbeschleunigung. Die Intensität der lateralen Eingriffe wird hierbei durch „A“ und „B“ beschrieben, während die Intensitäten der longitudinalen Komponente durch „I“ und „II“ beschrieben werden. Da die alleinigen Lenkeingriffe nicht berücksichtigt

wurden, können für 16 Eingriffskombinationen die mittleren resultierenden Fahrzeugreaktionen berechnet werden.

Hierzu wurden für die 16 Eingriffskombinationen jeweils die mittleren Störungsbewertungen und die mittleren Spannweiten der lateralen und longitudinalen Fahrzeugreaktion berechnet und als Ausgangspunkt für die multiple Regression verwendet. Dieses Vorgehen weicht von den herkömmlichen Kategorisierungsansätzen (z. B. Schmidt, 2009 oder Neukum, 2009) ab. Hierbei werden zunächst die aufgetretenen Gierraten in 0.5er-Schritten zusammengefasst. Im Anschluss daran werden für diese Kategorien die mittleren Störungsbewertungen berechnet. Auf Basis dieser Mittelwerte werden schließlich korrelative Bezüge hergestellt. Der Vorteil der hier verwendeten Kategorisierung liegt in der Reduktion der personengebundenen Varianz. Das Problem einer zu starken individuellen Abhängigkeit der Messwerte tritt dann auf, wenn einzelne Kategorien von nur sehr wenigen oder sogar nur von einem einzelnen Probanden stammen. Da es sich bei den hier vorzunehmenden Gruppierungen um post hoc Kategorisierung handelt, muss davon ausgegangen werden, dass bestimmte fahrdynamische Bereiche nur von einer begrenzten Probandenzahl erlebt wurden. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die oben beschriebene Kategorisierung anhand der Eingriffsbilder vorgenommen.

Da aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse davon ausgegangen werden kann, dass sowohl Einflüsse der Quer- und der Längskomponente in den subjektiven Wahrnehmungen wirksam werden (vgl. Kapitel 5), erfolgte die Analyse der Daten anhand der Einschlussmethode. Als Grundlage der multiplen Regression wird dabei der Ausdruck

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + \dots + b_j \times x_j + \varepsilon$$

verwendet. Für den vorliegenden Zusammenhang soll x_1 die Spannweite der Gierrate und x_2 die Spannweite der Längsbeschleunigung repräsentieren. Die Modellparameter b_0 , b_1 und b_2 bezeichnen die zu ermittelnden Beta-Koeffizienten, die zur bestmöglichen Beschreibung der Störungsbewertungen \hat{y} ermittelt werden. Eine exemplarische lineare Funktion ist in Abbildung 49 dargestellt.

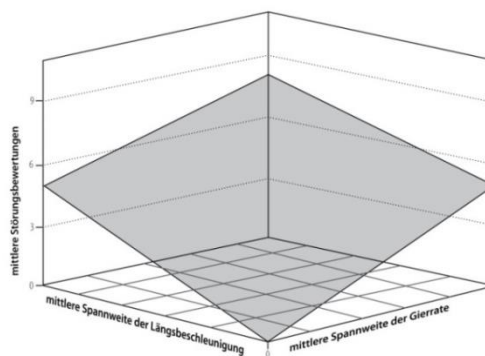


Abbildung 49: : Exemplarische Darstellung einer linearen Funktion in einen dreidimensionalen Raum mit den Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung als Prädiktoren der Störungsbewertungen. Hierbei wird angenommen, dass Kombinationen aus schwächeren Quer- und Längsreaktionen mit niedrigeren Störungsbewertungen einhergehen, während intensivere Kombinationen zu höheren Störungsbewertungen führen.

Um die Rolle und den Einfluss der beiden Eingriffskomponenten auf die Störungsbewertungen zu klären, werden in einem ersten Schritt die Daten aller Fahrszenarien in einer gemeinsamen Analyse untersucht.

In einem zweiten Schritt sollen die dabei gewonnenen Erkenntnisse weiter differenziert werden, indem Eingriffskombinationen mit Beschleunigungs- und Verzögerungskomponente getrennt analysiert werden.

6.1 Zusammenhänge unter Berücksichtigung aller Eingriffskombinationen

Werden die Daten aller untersuchten Fahrscenarien berücksichtigt, findet sich zunächst ein korrigiertes R^2 von .58 (siehe Tabelle 54) und damit eine Varianzaufklärung von 58% ($p < .001$, siehe Anhang). Die Abhängigkeiten zwischen den Spannweite der Gierrate und der Längsbeschleunigung sind zudem äußerst gering ($R = .175$, $p = .517$, siehe Anhang), sodass die Voraussetzungen der multiplen Regression als erfüllt betrachtet werden können.

Tabelle 54: Modellzusammenfassung für die multiple Regression mit den Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung aller Szenarien als Prädiktor für die Störungsbewertungen.

R	R^2	Korrigiertes R^2	SE des Schätzers
.799	.639	.583	.564

Abbildung 50 zeigt die mittleren Störungsbewertungen für die 16 unterschiedlich starken Eingriffskombinationen. Die Kombinationen sind dabei anhand der resultierenden Fahrzeugreaktion (Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung) beschrieben.

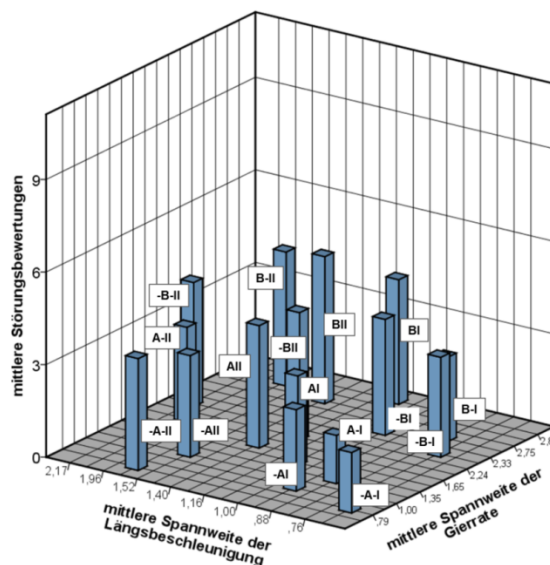


Abbildung 50: Darstellung der mittleren Störungsbewertungen für die mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigungen der 16 Eingriffskombinationen. Die Eingriffskombinationen sind anhand ihrer angeforderten Richtung und Intensität gekennzeichnet. Im Bereich der Querführung kennzeichnet „A“ eine niedrige Eingriffsintensität und „B“ eine höhere Intensität. Lenkeingriffe nach links sind zudem mit einem „-“ gekennzeichnet. Im Bereich der Längsführung werden weniger intensive Eingriffe mit „I“ und stärkere Eingriffe mit „II“ gekennzeichnet. Verzögerungen sind zusätzlich mit „-“ versehen. Mit stärkeren Kombinationen zeigen sich höhere mittlere Störungsbewertungen.

Die Visualisierung der mittleren Störungsbewertungen lässt dabei die grundsätzlich vermuteten Zusammenhänge sichtbar werden, wobei weniger intensive Kombinationen mit geringeren Störungsbewertungen einhergehen (vgl. Abbildung 49). Auch hier zeigt sich jedoch erneut das insgesamt

relativ niedrige Niveau der Störungsbewertungen. Bereiche, die tatsächlich eine kritische Wahrnehmung der Probanden verursachen, konnten mit den hier erzeugten Quer- und Längsreaktionen nicht erreicht werden.

Des Weiteren zeigt sich, dass sowohl die Spannweite der Gierrate als auch die Längsbeschleunigung hochsignifikant auf die Wahrnehmung der Fahrer wirken. (siehe Tabelle 55). Die standardisierten Beta-Koeffizienten zeigen hierbei, dass die lateralen Fahrzeugreaktionen geringfügig wichtiger für die wahrgenommenen Auswirkungen als die Reaktionen in der Längsführung sind.

Tabelle 55: Regressionskoeffizienten der multiplen Regression mit den mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung aller Fahrszenarien als Prädiktoren der mittleren Störungsbewertungen.

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Standardisierte Beta - Koeffizienten	T	Sig.
Konstante	1.048	.514		2.04	<.001
Spannweite der Gierrate	.647	.194	.564	3.33	<.001
Spannweite der Längsbeschleunigung	.895	.319	.476	2.81	<.001

Der positive Zusammenhang beider Maße untermauert zudem das oben beschriebene Wahrnehmungsmuster, mit dem größere Veränderungen (größere Spannweiten) mit höheren Störungsbewertungen einhergehen (vgl. hierzu auch Kapitel 5). Unter Berücksichtigung aller untersuchten Fahrszenarien ergibt sich damit die Vorhersage der Störungsbewertungen nach

$$\text{Störungsbewertung} = 1.048 + 0.647 \times \text{SpannGierr} + 0.895 \times \text{SpannLängs}$$

Die Vorhersage der Fahrerwahrnehmung durch diesen Ausdruck muss jedoch unter gewissen Einschränkungen vorgenommen werden. Zum einen sind die hier beschriebenen Zusammenhänge auf Basis eines Datensatzes entstanden, der äußerst wenig tatsächlich kritische Bewertungen enthält. Daher wird das Bewertungsmuster im Bereich stärkerer Fahrzeugreaktionen durch den oben beschriebenen lediglich extrapoliert. Denkbar wäre jedoch, dass die Fahrerurteile im höheren Skalenbereichen einer anderen Systematik folgen. Die Existenz abweichender Muster kann mit dem vorliegenden Datenbereich jedoch nicht überprüft werden. Zum anderen können anhand des hier formulierten Zusammenhangs nur 58% der Varianz erklärt werden. Die übrigen 42% müssen auf Grundlage der bisherigen Analysen als Fehlervarianz betrachtet werden. Der Erklärungswert dieses Ausdrucks bleibt daher eingeschränkt.

Eine mögliche Ursache für die unzureichende Varianzaufklärung kann in der zu Unrecht angenommenen Linearität des Zusammenhangs liegen. Die in Kapitel 2.6.3.3 besprochenen Auswirkungen von zusätzlichen Lenkmomenten zeigen, dass lineare Modelle die Zusammenhänge zwischen Fahrzeugreaktionen und wahrgenommenen Auswirkungen nur eingeschränkt erklären können. Schmidt (2009) stellte hierbei fest, dass der Erklärungswert einer Sigmoidfunktion den linearen Ansätzen überlegen ist. Im Bereich der kombinierten Eingriffe können daher ebenfalls nichtlineare Muster auftreten.

Lineare Verfahren würden sich damit etwas schlechter eignen, um Zusammenhänge zwischen den resultierenden Fahrzeugreaktionen und den subjektiven Bewertungen aufzudecken.

Ferner zeigt sich, dass eine getrennte Betrachtung von Eingriffen mit Beschleunigungs- und Verzögerungskomponente die Vorhersagekraft des Modells weiter erhöhen kann. Bei Eingriffskomponenten mit Verzögerungen konnten an verschiedenen Stellen nivellierende Auswirkungen der Bremseneingriffe festgestellt werden (siehe z. B. Kapitel 5.2.2). Die wahrgenommene Kritikalität dieser Eingriffe ist im Vergleich zu Beschleunigungs-Kombinationen deutlich geringer. Stärkere (positive) Beschleunigungseingriffe haben damit nicht zwangsläufig die gleichen Auswirkungen wie stärkere Bremseneingriffe und führen somit nicht zu einheitlichen Bewertungsmustern. Um die Zusammenhänge zwischen den resultierenden Fahrzeugreaktionen und den Störungsbewertungen besser auflösen zu können, bietet sich daher eine getrennte Betrachtung der Kombinationen mit Beschleunigungen und Verzögerungen an.

6.2 Zusammenhänge für Eingriffskombinationen mit positiver Längsbeschleunigung

Werden nur die Eingriffskombinationen mit positiver Beschleunigungskomponente berücksichtigt, können ca. 90% der Varianz durch die Spannweite der Gierrate und der Längsbeschleunigung erklärt werden (siehe Tabelle 56). Die Fahrerurteile können für diese Eingriffsart damit wesentlich besser anhand der resultierenden Fahrzeugreaktionen bzw. deren Veränderungen erklärt werden. Auch hier zeigt sich eine hochsignifikante Modellannahme ($p < .001$, siehe Anhang). Dennoch muss einschränkend erwähnt werden, dass durch den Ausschluss der übrigen Eingriffskombinationen weniger Datenpunkte vorliegen. Damit einhergehend verringert sich zwangsläufig auch die zu erklärende Varianz. Das verbesserte Ergebnis muss daher zum Teil auch auf die verwendete Berechnungsmethode zurückgeführt werden.

Tabelle 56: Modellzusammenfassung für die multiple Regression mit den mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung aller Szenarien als Prädiktor für die mittleren Störungsbewertungen.

R	R ²	Korrigiertes R ²	SE des Schätzers
.963	.927	.898	.224

Die Gewichtung und die Wirksamkeit der Quer- und Längskomponente weichen von dem oben dargestellten Muster ab. Zum einen kann für die Konstante kein signifikanter Einfluss gezeigt werden, zum anderen hängt die Spannweite der Längsbeschleunigung weniger mit dem Fahrerurteil als die Spannweite der Gierrate zusammen. Liegen Eingriffe mit Beschleunigungskomponente vor, wird die wahrgenommene Kritikalität der teilautomatischen Eingriffe also stärker durch das laterale Geschehen als durch die Längsführung beeinflusst.

Tabelle 57: Regressionskoeffizienten der multiplen Regression mit den mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung als Prädiktoren der mittleren Störungsbewertungen. In dieser Analyse wurden nur die Eingriffe mit positiver Beschleunigungskomponente berücksichtigt.

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Standardisierte Beta - Koeffizienten	T	Sig.
Konstante	.447	.513		2.87	.424
Spannweite der Gierrate	.719	.109	.798	6.60	.001
Spannweite der Längsbeschleunigung	1.558	.389	.484	4.00	.010

Anhand der Visualisierung der mittleren Störungsbewertungen kann dieser Trend nachvollzogen werden. Zum einen zeigt sich ein klarer Anstieg mit stärkeren Fahrzeugreaktionen. Auch hier verbleiben die mittleren Maximalwerte auf einem „störenden“ Niveau.

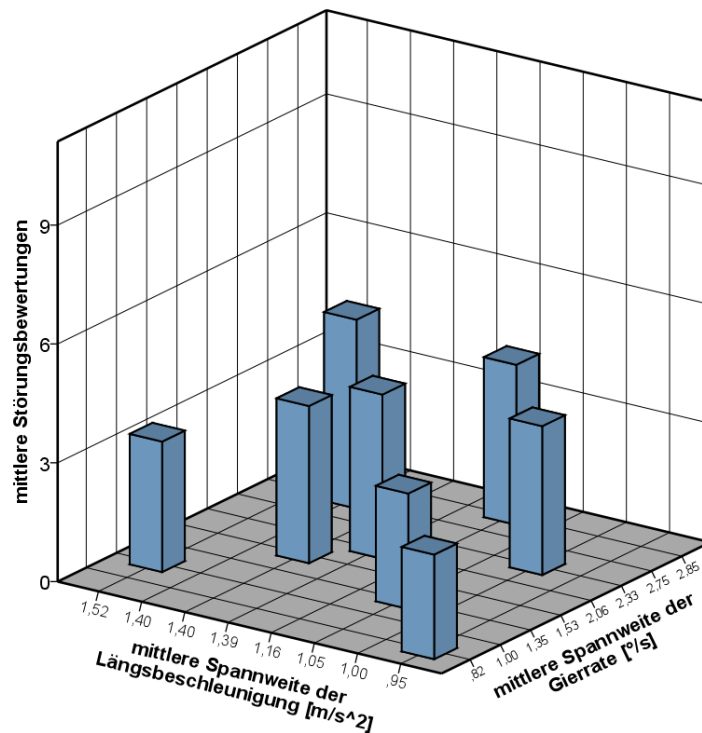


Abbildung 51: Darstellung der mittleren Störungsbewertungen für die mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigungen der 8 Eingriffskombinationen mit Beschleunigungskomponente. Mit stärkeren Kombinationen zeigen sich höhere mittlere Störungsbewertungen. Zudem gehen höhere Störungsbewertungen mit höheren Gierreaktionen des Fahrzeugs einher, ohne dass stärkere Veränderungen in der (positiven) Längsbeschleunigung notwendig sind.

Zum anderen treten bereits mit geringen Veränderungen der longitudinalen Beschleunigungen höhere Störungsbewertungen auf, sofern stärkere Gierreaktionen vorliegen. Diese leicht „schiefe“ Verteilung der Mittelwerte zugunsten der Spannweite der Gierrate kann als Ausdruck der oben beschriebenen Gewichtung gesehen werden. Die wahrgenommenen Auswirkungen der lateralen Fahrzeugreaktion sind nahezu über den gesamten Bereich der longitudinalen Beschleunigung erhöht. Stärkere Beschleunigungen müssen hierfür nicht auftreten.

6.3 Zusammenhänge für Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponente

Die getrennte Betrachtung der Verzögerungskombinationen zeigte gegenüber den Beschleunigungskombinationen eine geringere Vorhersagekraft. Dennoch tritt gegenüber dem Gesamtdatensatz eine Verbesserung auf, indem 64% der Störungsbewertungs-Varianz durch beide Einflussgrößen erklärt werden können (Tabelle 58).

Tabelle 58: Regressionskoeffizienten der multiplen Regression mit den mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung aller Fahrscenarien als Prädiktoren der mittleren Störungsbewertungen.

R	R ²	Korrigiertes R ²	SE des Schätzers
.862	.744	.641	.575

Zudem weicht das Gewichtungsmuster deutlich von den oben beschriebenen Zusammenhängen ab. Allein für die Spannweite der Längsbeschleunigung kann ein signifikanter Einfluss auf das Fahrerurteil festgestellt werden. Werden also Bremsmanöver als Bestandteil teilautomatisierter Eingriffskombinationen dargeboten, beeinflussen diese das Fahrerurteil wesentlich stärker als das laterale Geschehen.

Tabelle 59: Regressionskoeffizienten der multiplen Regression mit den mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung als Prädiktoren der mittleren Störungsbewertungen. In dieser Analyse wurden nur die Eingriffe mit Verzögerungskomponente berücksichtigt.

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Standardisierte Beta – Koeffizienten	T	Sig.
Konstante	.817	.636		1.28	.255
Spannweite der Gierrate	.499	.282	.414	1.77	.137
Spannweite der Längsbeschleunigung	1.000	.354	.661	2.83	.037

Die Visualisierung des Datensatzes würde dieses Gewichtungsverhältnis zunächst so nicht vermuten lassen, da mit größeren Gierraten-Spannweiten zumindest geringfügig erhöhte Bewertungen auftreten (siehe Abbildung 52). Dennoch deuten die geringen Störungsbewertungen im Bereich der mittelstarken Fahrzeugreaktionen darauf hin, dass größere Veränderungen der Längsbeschleunigung notwendig sind, um erhöhte Störungsbewertungen hervorzurufen.

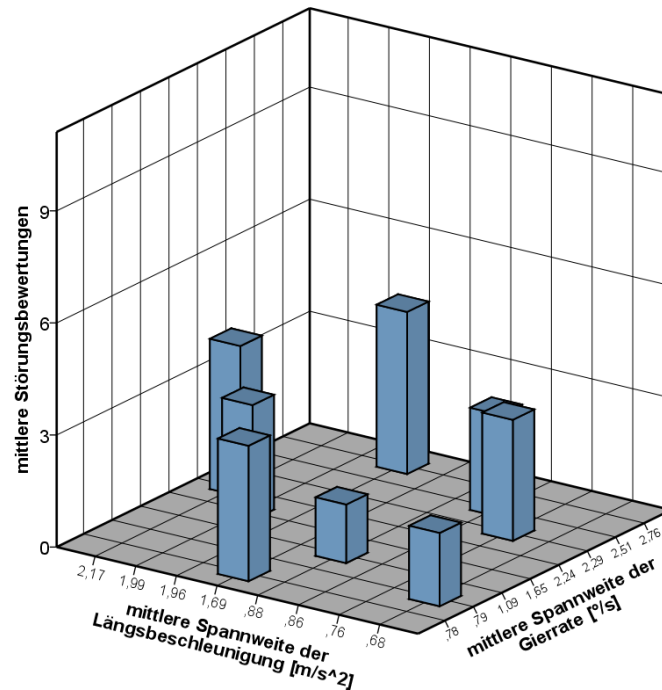


Abbildung 52: Darstellung der mittleren Störungsbewertungen für die mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigungen der acht Eingriffskombinationen mit Verzögerungskomponente. Höher Störungsbewertungen sind eher von stärkeren Veränderungen der Längsbeschleunigung als von der Spannweite der Gierrate abhängig.

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Zusammenhängen zwischen resultierenden Fahrzeugreaktionen und Störungsbewertungen

Um Zusammenhänge zwischen den resultierenden Fahrzeugreaktionen beider Eingriffsdimensionen und den subjektiven Störungsbewertungen aufzudecken, wurden die Daten einer multiplen Regressionsanalyse unterzogen. Hierfür wurden für alle 16 dargebotenen Eingriffskombinationen sowohl die mittleren Störungsbewertungen als auch die mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung über alle Fahrszenarien berechnet. In einem ersten Schritt wurden die Mittelwerte aller dargebotenen Eingriffskombinationen analysiert. Hierbei konnten 58% der Varianz der Störungsbewertungen auf die Kennwerte der resultierenden Fahrzeugreaktionen zurückgeführt werden. Diese globale Betrachtung zeigt, dass die Veränderungen beider Eingriffsdimensionen Einfluss auf das Fahrerurteil haben können. Die Auswirkungen der lateralen Komponenten überwiegen innerhalb dieser Betrachtung leicht.

Da sich in den vorherigen Analysen zum Teil starke Unterschiede zwischen Eingriffskombinationen mit Beschleunigungs- und Verzögerungskomponente gezeigt haben, wurden beide Typen einer getrennten Analyse unterzogen. Diese Betrachtung konnte zeigen, dass sich der Anteil an erklärter Varianz zum Teil noch erheblich steigern lässt. Für Eingriffe mit Verzögerungskomponente kann ein lineares Modell ca. 64% der Varianz durch die Veränderungen der Gierrate und der Längsbeschleunigung erklären. Werden die Mittelwerte der Kombinationen mit Beschleunigungskomponente zugrunde gelegt, steigert sich die Vorhersagekraft weiter auf ca. 90%. Obwohl damit ein sehr guter Erklärungswert erreicht wird, dürfen die hier berichteten Zusammenhänge nicht vorbehaltlos interpretiert werden. Da tatsächlich kaum kritische Bewertungen erreicht wurden, beruht die Vorhersage auf Datenpaaren in einem mittleren

fahrdynamischen Niveau. Ob die Systematik des Fahrerurteils in Bereichen mit höheren Dynamiken auf den gleichen Zusammenhängen beruht, kann anhand des vorliegenden Datensatzes nicht bestätigt werden. Aussagen über diesen Bereich beruhen auf einer Extrapolation.

Dennoch lässt sich anhand der obigen Ergebnisse feststellen, dass beide Kombinationsarten mit leicht unterschiedlichen Bewertungsmustern einhergehen und gesonderte Betrachtungen erfordern. Treten positive Beschleunigungen auf, reagieren Fahrer sehr sensitiv auf gleichzeitig stattfindende laterale Fahrzeugreaktionen. Höhere Störungsbewertungen treten bereits mit stärkeren Veränderungen der Gierreaktion auf, ohne dass hierfür stärkere Veränderungen der Längsbeschleunigung notwendig wären. Sollte also in Folgeuntersuchungen der Einfluss der lateralen Komponente innerhalb von teilautomatisierten Eingriffen untersucht werden, bietet sich die gleichzeitige Darbietung von Beschleunigungen an. Dieses Setting sollte besonders sensitiv auf Eingriffe in die Querführung reagieren und Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion effektiv aufzeigen. Für teilautomatisierte Eingriffe mit Verzögerungskomponente gilt dieses Muster nicht. Hier dominiert die Längsführung das Fahrerurteil. Ansätze, die hauptsächlich die Auswirkungen longitudinaler Eingriffe untersuchen, sollten daher auf die Darbietung von Verzögerungen zurückgreifen.

Insgesamt gelingt die Erklärung des Fahrerurteils durch die Veränderungen der lateralen und longitudinalen Fahrzeugdynamik relativ gut. Fraglich bleibt dennoch, inwieweit sich auch stärkere Dynamiken in dieses Urteilmuster fügen. Überdies bleibt offen, ob die Wahrnehmung der Auswirkungen besser durch nicht-lineare Zusammenhänge erklärt werden kann. Folgende Untersuchungen sollten daher die Passung weiterer Flächen an die ermittelten Störungsbewertungen berücksichtigen.

7 Zusammenfassende Diskussion

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Beherrschbarkeit von teilautomatisierten Fahrfunktionen. Teilautomatisierte Systeme stellen einen nächsten Schritt in der Entwicklung höher automatisierter Fahrfunktionen dar und zeichnen sich gegenüber herkömmlichen Assistenzfunktionen durch einen erweiterten Leistungsumfang aus. Hierzu gehört die kurz- oder langfristige Ausführung von gleichzeitigen Eingriffen in die Quer- und Längsführung. Mit der Nutzung von Funktionen dieser Art von ergeben sich verschiedene Anforderungen an den Fahrer, die eng mit dessen Fähigkeiten verknüpft sind, in Grenz- oder Fehlerfällen angemessen reagieren zu können. Dazu gehört die Fähigkeit, die teilautomatisiert ausgeführte Fahraufgabe zunächst zu überwachen und zudem unmittelbar und ohne zeitliche Reserve wieder zu übernehmen (Gasser, 2012).

Verschiedene theoretische und empirische Arbeiten zu diesem Thema legen den Schluss nahe, dass diese Fähigkeiten durch die Fahrfunktion selbst sowohl begünstigt als auch beeinträchtigt werden können. Begünstigende Einflüsse werden in der Tatsache gesehen, dass freie kognitive Ressourcen die Aufrechterhaltung eines angemessenen Situationsbewusstseins fördern. Unerwünschte Einflüsse werden mit Überlegungen verbunden, die sich auf den Verlust basaler Kontrollschleifen der Handlungsregulation beziehen (Popken, 2009). Da Beherrschbarkeitsuntersuchungen den Ausschluss negativer Interaktionseffekte fokussieren, stellt der beschriebene Widerspruch eine wichtige Fragestellung für den Bereich der teilautomatisierten Fahrfunktionen dar. Übernahme-situationen treten an Systemgrenzen auf und sollten in jedem Fall durch den Fahrer beherrschbar sein. Daneben stellt der Response Code of Practice die Frage nach dem Umgang mit möglichen Systemfehlern (PReVENT, 2009). Da teilautomatisierte Systeme sowohl die Quer- als auch die Längsführung beeinflussen, muss die Frage der Beherrschbarkeit auf gleichzeitige Eingriffe in die Quer- und Längsführung bezogen werden. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass kombinierte Eingriffe in die Fahrzeugführung aufgrund mangelnder Handlungs-routinen potentiell beanspruchender sind als eindimensionale, fahrerassistenzbasierte Eingriffe.

Diese beiden Aspekte bringen eine Reihe nachgeordneter Fragestellungen mit sich (vgl. Kapitel 3), denen in zwei empirischen Untersuchungen nachgegangen wurde. In einer Simulatorstudie (n=59) wurde zunächst die Frage untersucht, inwieweit sich die Darbietung von Systemgrenzen und Systemfehlern einer teilautomatisierten Fahrfunktion auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auswirkt (Frage 1 und 2) Systemgrenzen wurden hierbei als unmittelbare Deaktivierungen der Fahrfunktion umgesetzt, die sich in einem plötzlichen Wegfall der zuvor automatisch ausgeführten Quer- und Längsführung äußerte. Die Systemfehler wurden in Form eines sprunghaften Lenkmoments nach links mit einer gleichzeitigen positiven Beschleunigung umgesetzt. Zudem konnte ein Vergleich zwischen den Auswirkungen beider systembasierten Ereignisse vorgenommen werden (Frage 4). Das Untersuchungsszenario bestand dabei aus einer Fahrfahrt mit automatisierter Spur- und Abstandshaltung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt die Diskussion der Fragestellung 3 in einem späteren Abschnitt dieses Kapitels.

In diesem Zusammenhang wurde zudem der Frage nachgegangen, in welchen Fahrszenarien sich die Auswirkungen der beiden Systemzustände besonders gut zeigen lassen, bzw. unter welchen äußeren

Bedingungen vergleichbare Eingriffe besonders schwere Folgen haben (Frage 5). Diese Fehlerbilder und Übernahme-situationen wurden zunächst konstant gehalten und innerhalb einer einfachen Geradeausfahrt, einer Einfahrt in eine simulierte Baustelle und innerhalb eines Kurvenszenarios getestet. Dabei wurde der Faktor „Systemstatus“ (Übernahmesituation und Systemeingriff) zwei getrennten Versuchsgruppen dargeboten. Die Probanden beider Versuchsgruppen erlebten das jeweilige Systemverhalten in allen Fahrszenarien (Fahrszenario als Inner-Subjekt-Faktor). Dabei wurde der Ort, an dem das Systemereignis innerhalb der zusammenhängenden Versuchsfahrt auftrat (Geradeausfahrt, Baustelleneinfahrt, Kurvenszenario) permutiert, sodass die tatsächliche Systemreaktion, trotz wiederholter Messungen, nicht vorhergesagt werden konnte.

In einem weiteren Fahrszenario wurde zudem in einem ersten Schritt der Frage nachgegangen, inwieweit die Richtung der longitudinalen Eingriffskomponente einen Einfluss auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (positive Beschleunigung oder Verzögerung) ausübt. Hierzu wurde innerhalb einer simulierten Baustellenausfahrt eine zur Baustelleneinfahrt komplementäre Situation umgesetzt, deren Bedingungen sich nur durch die Darbietung einer Verzögerungs- anstatt einer Beschleunigungskomponente unterschieden. In allen Fahrszenarien und Versuchsbedingungen wurden die subjektiven Störungsbewertungen und verschiedene fahrphysikalische Kennwerte zur Beschreibung des Fahrerverhaltens analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine unmittelbare Übernahme der zuvor automatisch durchgeführten Fahraufgabe in allen untersuchten Szenarien erfolgreich ausgeführt werden konnte. Die mittleren Störungsbewertungen liegen im „störenden Bereich“ und weisen damit lediglich auf ein mittleres Ausmaß subjektiv empfundener Kritikalität hin. Auf der Verhaltensebene lassen sich zudem schnelle lenkungsbezogene Reaktionszeiten finden, die zeigen, dass auf die rückstellbedingten Auslenkungen schnell reagiert werden kann. Innerhalb der Geradeausfahrt und des Kurvenszenarios werden die Auswirkungen der plötzlichen Deaktivierung nach ca. 400 Millisekunden begrenzt. Diese Reaktionen relativieren die etwas größeren maximalen Auslenkungen des Kurvenszenarios, sodass hier nicht von einer problematischen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ausgegangen werden muss. Die Intensität, mit der die Fahrer bremsen, stützt diese Interpretation ebenfalls. Dort, wo stärkere Bremsmanöver notwendig sind, werden diese auch ausgeführt. Sind stärkere Bremsungen zur Bewältigung der Situation nicht notwendig, bleiben diese aus.

Insgesamt zeigt sich damit ein adaptives und angemessenes Bremsverhalten der Versuchsteilnehmer. Dem Szenario der Baustelleneinfahrt muss dennoch mit erhöhter Aufmerksamkeit begegnet werden, da hier infolge der plötzlichen Deaktivierung der teilautomatisierten Fahrfunktion eine relativ geringe Bremsintensität mit relativ späten Begrenzungen der Auslenkungen auftritt. Diese Verhaltensmuster werden von etwas erhöhten Störungsbewertungen begleitet, sodass sich damit ein eher unerwünschtes Ergebnismuster zeigt. Kompensatorische Handlungen scheinen nicht in vollem Umfang ausgeführt zu werden. Dennoch müssen diese Befunde relativiert werden, da die subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen dieser Situation keine tatsächlichen kritischen Regionen erreichen und zudem nur geringe maximale Auslenkungen auftreten. Dennoch lassen sich potentielle Auswirkungen unmittelbarer Übernahme-situationen anhand der simulierten Einfahrt in eine Baustelle besonders gut nachvollziehen.

Plötzliche Eingriffe in die Fahrzeugführung haben im Vergleich zu den Übernahmeszenarien stärkere Auswirkungen auf das Verhalten und Erleben. Eingriffsepisoden, die aus einer kombinierten Manipulation der Quer- und Längsführung bestehen, gehen innerhalb des Baustellen- und des Kurvenszenarios mit subjektiven Bewertungen einher, die den „störenden“ Bereich verlassen. Eine Analyse des Verhaltens zeigt zum einen, dass insbesondere innerhalb des Kurvenszenarios auch stärkere Auswirkungen auf die Fahrzeugführung auftreten, indem größere Auslenkungen zugelassen werden. Auf der anderen Seite treten jedoch auch deutliche kompensatorische Handlungen auf, die eine angemessene Reaktion auf das Ereignis zeigen und auf eine angemessene Beherrschbarkeit schließen lassen. Hierzu gehören sehr schnelle Begrenzungen des Lenkeingriffs (ca. 350 ms) und starke Bremsreaktionen, die die Situation weiter entschärfen. Unter methodischen Gesichtspunkten zeigt sich hierbei erneut die Notwendigkeit, sowohl die Erlebens- als auch die Verhaltensebene zu betrachten. Eine alleinige Analyse der subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen würde aufgrund der erhöhten mittleren Störungsbewertungen auf Probleme in der Beherrschbarkeit hindeuten. Ergebnisse dieser Art bestätigen den von Neukum et al. (2008) geforderten „Mehrfach-Kriterien-Ansatz“, für die Bewertung der Beherrschbarkeit neuer Systeme.

Insgesamt zeigt sich, dass die Auswirkungen von kombinierten Eingriffen in die Fahrzeugführung anhand eines Kurvenszenarios besonders gut untersucht werden können. Dieses Prüfzenario unterscheidet sich von den für die Bewertung von alleinigen Lenkeingriffen favorisierten Engstellensituationen (Schmidt, 2009). Ein Vergleich beider systembasierter Ereignisse zeigt zudem, dass unerwartete Eingriffskombinationen stärkere Auswirkungen auf das Erleben und Verhalten haben und damit eine potentiell höhere Kritikalität besitzen. Dieser Trend zeigte sich weitestgehend konsistent in allen untersuchten Fahrszenarien.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse müssen einige Kritikpunkte beachtet werden. Unter methodischen Gesichtspunkten muss zunächst angemerkt werden, dass die Probanden der Studie den systembasierten Ereignissen wiederholt ausgesetzt wurden. Obwohl der tatsächliche Ort des Auftretens nicht vorhergesagt werden konnte, musste den Probanden die Möglichkeit einer plötzlichen Übernahme bzw. eines unerwarteten Eingriffs nach dem ersten Auftreten bewusst sein. Grundsätzlich kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass die hier beobachteten Verhaltensweisen exemplarisch für einen gänzlich unvorbereiteten Fahrer stehen können. Um diese Frage zu beantworten, bieten sich Ansätze an, die die Effekte eines einmaligen Ereignisses nach einem längeren Einsatz ohne besondere Ereignisse untersuchen.

Ein weiterer Diskussionspunkt kann in der Tatsache gesehen werden, dass zwar das Fahrerverhalten und die Wahrnehmung der Probanden untersucht, jedoch keine Auswirkungen auf das weitere Verkehrsgeschehen betrachtet wurden. Wenngleich die Fahrerreaktion in Bezug auf das Führungsfahrzeug als unkritisch betrachtet werden kann, stellt sich die Frage nach den folgenden, rückwärtigen Fahrzeugen. Einerseits kann dabei die Frage aufgeworfen werden, inwieweit Fahrer in folgenden Fahrzeugen in der Lage sind, mit den kompensatorischen Verhaltensweisen der Fahrer vor ihnen umzugehen, die ihrerseits ein systembasiertes Ereignis kontrollieren müssen. Diese Fragen verlassen jedoch das eigentliche Gebiet der Beherrschbarkeit von automatischen Fahrfunktionen und

sind unter Umständen durch den Verweis auf einzuhaltende Sicherheitsabstände zu klären. Wird dieser Aspekt jedoch auf den Fahrer des betreffenden Fahrzeugs bezogen, sollte auch betrachtet werden, inwieweit Fahrer in der Lage sind ihre kompensatorischen Bremsreaktionen so anzupassen, dass keine potentiell kritischen Situationen für den folgenden Verkehr entstehen. Dazu kann es z. B. nötig sein, nach manuell ausgeführten Bremsengriffen, wieder zu beschleunigen. Derartige Situationen wurden in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht hergestellt (z. B. durch folgende Fahrzeuge) und entsprechende Verhaltensweisen des Fahrers wurden dementsprechend auch nicht untersucht. Insgesamt scheint die Analyse der Auswirkungen auf das Verhalten anderer Fahrer dennoch interessant. Mühlbacher et al. (2011) besprechen im Rahmen einer „Pulksimulation“ verschiedene Maße, die das Verhalten eines oder mehrerer anderer Fahrer beschreiben können. Dabei wird der Einsatz von „lokalen Messungen“ (Parameter, die das Verhalten der übrigen Fahrzeuge an einem bestimmten Ort beschreiben), „momentanen Messungen“ (Maße, die das Verhalten der übrigen Fahrzeuge zu einem bestimmten Zeitpunkt erfassen) und „räumlich-zeitlichen Messungen“ (Parameter, die das Verhalten über einen Zeitverlauf an einem bestimmten Ort beschreiben) erörtert. Maße dieser Art können in folgenden Untersuchungen auch Auskunft über die Auswirkungen von Eingriffen auf weitere Fahrer geben.

Neben diesen Aspekten muss auch die Tatsache berücksichtigt werden, dass die oben besprochenen Erkenntnisse durch eine Untersuchung in einem feststehenden Fahrsimulator gewonnen wurden. Hiermit sind die üblichen Einschränkungen der simulatorgestützten Untersuchungsansätze verbunden, da keine kinästhetischen Rückmeldungen vermittelt werden können. Da sich diese Wahrnehmungsaspekte jedoch für die Bewertung der Beherrschbarkeit als besonders bedeutsam erwiesen haben (Neukum, 2009), muss davon ausgegangen werden, dass die hier verwendeten Eingriffs- und Übernahmecharakteristika unter realen Bedingungen oder in einem dynamischen Simulator stärkere Auswirkungen gezeigt hätten. Denkbar wäre zudem, dass zwischen den beiden systembasierten Ereignissen noch größere Unterschiede auftreten. Die aktiven Eingriffe in die Längsführung des Fahrzeugs, die nur bei der Darbietung von Systemfehlern auftraten, dürften die Störungsbewertungen gegenüber den Übernahme-situationen weiter erhöhen.

Neben dem Vergleich von Übernahmeaufforderungen und Systemeingriffen war das zweite große Ziel der Arbeit die Untersuchung der Auswirkungen spezifischer Eingriffskombinationen. In einer Realfahrtstudie ($n = 55$) wurden hierzu Stärke und Richtung von kombinierten Eingriffen in die Quer- und Längsführung systematisch variiert (Frage 6 und 7). Um die Auswirkungen dieser Kombinationen mit „eindimensionalen“ Eingriffen vergleichen zu können, wurden zudem alleinige Lenkeingriffe mit unterschiedlichen Intensitäten und Richtungen dargeboten (Frage 3). Diese Fehlerbilder wurden ebenfalls in mehreren Fahrszenarien untersucht, um die Erkenntnisse zur Sensitivität verschiedener Prüf-szenarien weiter zu differenzieren (Frage 5). Hierzu gehörten eine einfache Geradeausfahrt, ein Kurvenszenario, ein Fahrstreifenwechsel und ein Engstellenszenario. Die Eingriffsbilder wurden in vier Versuchsgruppen untersucht, wobei jeder Gruppe eine der vier möglichen Richtungskombinationen aus Quer- und Längseingriff dargeboten wurde. Die Darbietung der unterschiedlichen Eingriffsintensitäten erfolgte in randomisierter Reihenfolge. Jede Versuchsperson wurde dabei allen Eingriffsmustern der jeweiligen Versuchsgruppe in allen Fahrszenarien ausgesetzt. Auch in dieser Untersuchung wurden die

subjektiven Störungsbewertungen der Probanden als auch verschiedene Verhaltensmaße, einschließlich der resultierenden Fahrzeugreaktionen, untersucht.

Die hierbei gewonnen Erkenntnisse betreffen sowohl inhaltliche als auch methodische Aspekte der Bewertung von teilautomatisierten Eingriffen in die Fahrzeugführung. Unter inhaltlichen Gesichtspunkten konnte festgestellt werden, dass die hier untersuchten Eingriffskombinationen gut beherrschbar sind und nicht mit Charakteristika einer problematischen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einhergehen. Darüber hinaus zeigte sich, dass Eingriffskombinationen, die aus einer (positiven) Beschleunigungskomponente und zeitgleichen Eingriffen nach rechts bestehen, mit erhöhten Störungsbewertungen versehen werden. Dieser Trend konnte verhältnismäßig stabil in allen untersuchten Szenarien gefunden werden. Ebenso stabil zeigten sich zudem die Ergebnismuster auf der Verhaltensebene. Wurden mit subjektiv störenden Eingriffskombinationen größere Auslegungen zugelassen, konnten kompensatorische Reaktionen festgestellt werden, die sich in schnellen Begrenzungen der Lenkeingriffe äußerten. Auf der anderen Seite konnten bei Kombinationen mit weniger starkem Einfluss auf die Wahrnehmung verlängerte Reaktionszeiten festgestellt werden. Diese Muster werden im Sinne des bereits angesprochenen Adaptionsvermögens interpretiert. Nur auf Eingriffskombinationen, die ein gewisses Maß an wahrgenommener Kritikalität mit sich bringen, wurde mit schnelleren Begrenzungen reagiert. Zu vergleichbaren Befunden kommt Schmidt (2009), wo wiederholt verbesserte Reaktionszeiten für Lenkeingriffe mit erhöhten Störungsbewertungen festgestellt werden.

Die Rolle der Eingriffsrichtungen hat sich in diesem Zusammenhang als besonders relevant erwiesen. Wurden Bremsmanöver dargeboten, zeigte sich an verschiedenen Stellen eine nivellierende Wirkung auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Darüber hinaus konnten zudem Auswirkungen der Eingriffsrichtung im Bereich der Querführung festgestellt werden. Für das Szenario der Kurvenfahrt erscheinen die oben beschriebenen Muster plausibel und lassen sich besonders gut nachvollziehen. Innerhalb einer Linkskurve werden Beschleunigungen mit Eingriffen nach rechts als „aus der Kurve heraus beschleunigen“ empfunden und dementsprechend als störender bewertet als Beschleunigungen mit Lenkeingriffen zum Kurveninneren. Auch hier korrelieren die erhöhten bzw. verringerten lenkradbezogenen Reaktionszeiten mit den subjektiven Bewertungen.

Die hierbei festgestellte laterale Richtungsabhängigkeit der Erlebens- und Verhaltensmaße stellt jedoch zugleich einen der wichtigsten ungeklärten Punkte der vorliegenden Arbeit dar. Obwohl die Richtung der Lenkeingriffe innerhalb eines Kurvenszenarios durchaus unterschiedliche Bedeutungen haben können, sind Ursachen für Richtungseffekte innerhalb der einfachen Geradeausfahrt und innerhalb der Engstelle schwer zu benennen. Während für die Geradeausfahrt noch infrastrukturelle Gründe herangezogen werden können (in einigem Abstand bauliche Begrenzungen auf einer Fahrzeugseite), lassen sich derartige Ursachen nur schwer auf die Engstelle übertragen. Hier wurde eine Begrenzung des Fahrstreifens durch eine Pylonengasse vorgenommen. Obwohl damit zu beiden Fahrzeugseiten vergleichbare Bedingungen vorlagen, zeigten sich stärkere Auswirkungen auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, wenn die Eingriffe nach rechts erfolgten.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien herzustellen, wurden die Auswirkungen der Kombination aus Lenkeingriff nach rechts (bzw. Kurvenaußen) und gleichzeitiger Beschleunigung untersucht. Die Intensität, mit der die positiven Beschleunigungen dargeboten wurden, zeigten hierbei zwar Auswirkungen auf die Störungsbewertungen, ohne dass jedoch konstante Auswirkungen auf der Verhaltensebene festgestellt werden konnten. So gab es keine Effekte auf die zugelassene Auslenkung wohl aber auf deren Zeitpunkt. Auf stärkere Eingriffe in die Längsführung des Fahrzeugs wurde damit innerhalb des Lenkverhaltens nicht anders, aber später reagiert. Damit zeigt sich ein eher unerwünschtes Ergebnismuster, das jedoch aufgrund der insgesamt geringen Auslenkungen relativiert werden kann. Darüber hinaus scheinen sich diese Effekte nicht auf alle Fahrszenarien, sondern im Wesentlichen auf den Fahrstreifenwechsel und die Engstelle zu beziehen.

Der Einfluss des Fahrszenarios auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion erscheint hingegen weitgehend konsistent in allen Maßen. Der Vergleich der verschiedenen Szenarien zeigt die besondere Sensitivität des Kurvenszenarios für die Untersuchung der teilautomatisierten Eingriffe. Identische Eingriffskombinationen werden innerhalb des Kurvenszenarios als störender empfunden und gehen mit größeren maximalen Auslenkungen einher. Ebenso lassen sich innerhalb dieses Vergleiches erneut die kompensatorischen Reaktionen feststellen, wobei die lenkradbezogenen Reaktionszeiten allen anderen Szenarien überlegen sind. Die Sensitivität einer Kurvenfahrt stellt eine Besonderheit dar, die für assistenzbasierte Eingriffe bisher nicht gefunden wurde. Sowohl Schmidt (2009) als auch Neukum (2009) verwenden für die Untersuchung von Lenkeingriffen Engstellenszenarien.

Für Übernahmeszenarien nach hochautomatisierten Fahrten konnten Damböck et. al. (2012) hingegen keine herausragenden Anforderungen einer Kurvenfahrt feststellen. Im Vergleich zu Fahrsituationen, die größere Anforderungen als die bloße Fahrzeugstabilisierung an den Fahrer stellten (Fahrstreifenwechsel und korrekte Auswahl einer Fahrtrichtung), zeigten sich stärkere Probleme. Diese Ergebnisse stehen zunächst im Widerspruch zu den hier dargestellten Befunden. Da den Übernahmeszenarien sogar hochautomatisierte Fahrten mit Ablenkungen vorausgingen, ist der Unterschied zudem besonders groß. Eine Übernahme einer teilautomatisierten Fahrt sollte demzufolge weniger deutlich herausstechen.

Für diese Diskrepanz kommen mehrere Erklärungen in Frage. Zunächst kann davon ausgegangen werden, dass sich die Fahrszenarien selbst deutlich unterschieden. Da Damböck et al. in erster Linie die Übernahmeleistung bei einem Wegfall der Fahrstreifenmarkierung untersuchten, standen nicht die Auswirkungen einer typischen Kurvenfahrt im Fokus. Die Darstellungen des Versuchsaufbaus lassen vermuten, dass ein deutlich geringerer Kurvenradius als in der hier dargestellten Simulatorstudie verwendet wurde. Der plötzliche Wegfall der teilautomatisierten Unterstützung hatte innerhalb der engen, einspurigen Kurve daher wahrscheinlich einen bedrohlicheren Charakter. Da die Übernahme der hochautomatisierten Fahrt zudem mindestens vier Sekunden vor der Deaktivierung angekündigt wurde, bedienen sich beide Studien unterschiedlicher Herangehensweisen. Angekündigte Übernahmen erlauben eine gewisse Vorbereitung und daher planvollere Fahrreaktionen als unerwartete Ausfälle. Vor diesem Hintergrund erscheinen auch die deutlichen Abweichungen des bei Damböck et al. gemessenen Komforterlebens von den hier gefundenen erhöhten Störungsbewertungen nachvollziehbar. Die Ergebnisse beider Studien stehen daher nicht im Widerspruch zueinander. Vielmehr lässt sich die

besondere Sensitivität des hier untersuchten Kurvenszenarios auf abweichende Untersuchungsansätze zurückführen.

Der oben beschriebene Vergleich von alleinigen Lenkeingriffen und kompletten Eingriffskombinationen zeigte ebenfalls einige unerwartete Ergebnisse. Gleichzeitige Eingriffe in die Quer- und Längsführung gehen nicht zwangsläufig mit einer schlechteren subjektiven Beherrschbarkeit einher. Liegen nur schwächere, aber dennoch komplette Kombinationen vor, können deren subjektive Auswirkungen oftmals nicht von den Folgen der alleinigen Lenkeingriffe unterschieden werden. Wird die Wahrnehmung der Eingriffe zudem in Bezug zu den dargebotenen Intensitäten gesetzt, scheint sich eine Dominanz der lateralen Komponente zu zeigen. Mit stärkeren Eingriffen in die Querführung des Fahrzeugs wird weniger zwischen unterschiedlich starken Brems- oder Beschleunigungsmanövern differenziert.

Im Hinblick auf die methodischen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit können verschiedene Aspekte des Untersuchungsansatzes und der verwendeten Maße festgehalten werden. Ein zentraler Punkt bezieht sich hierbei auf die wechselseitige Beeinflussung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion durch Einflüsse der lateralen und longitudinalen Eingriffskomponenten. In der überwiegenden Anzahl der Analysen konnten Interaktionen zwischen den Eigenschaften der Quer- und Längseingriffe festgestellt werden. Dabei wirkten entweder die Intensitäten der Eingriffe in die Lenkung bzw. in die Längsführung oder deren Richtungen wechselseitig auf das Erleben und Verhalten der Probanden. Das Auftreten solcher Interaktionen zeigt, dass die tatsächliche Ausprägung eines Maßes, wie zum Beispiel die wahrgenommenen subjektiven Auswirkungen eines Eingriffs, nicht durch einzelne, unabhängige Anforderungen der einzelnen Komponenten erklärt werden können. Die entsprechenden Muster der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion können nur durch das gemeinsame Wirken beider Komponenten erzeugt werden. Welche Auswirkung die laterale Eingriffskomponente hat, ist dabei von den Auswirkungen der longitudinalen Komponente abhängig.

Werden diese Ergebnisse auf den Untersuchungsansatz von teilautomatisierten Eingriffen bezogen, muss davon ausgegangen werden, dass eine Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion die Betrachtung und Variation beider Eingriffskomponenten erfordert. In der vorliegenden Arbeit wurden hierzu die Intensität und Richtung der Komponenten variiert. Dennoch ist auch der Einfluss weiterer Eigenschaften, wie die eigentliche Signalform oder deren Dauer, denkbar. Die hier erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass „übergreifende“ Interaktionen häufiger für die Eingriffsrichtungen als für die Intensitäten der Quer- und Längskomponenten festgestellt werden konnten. Eine Variation der Richtungen beider Komponenten scheint damit besonders interessant. Da mit den hier verwendeten Intensitäten jedoch keine tatsächlichen kritischen Störungsbewertungen erreicht wurden, kann die Verwendung stärkerer Eingriffe dennoch zu einer größeren Anzahl und damit zu einer stärkeren Verzahnung beider Komponenten führen. Die Variation der Stärke, mit der in beide Dimensionen der Fahrzeugführung eingegriffen wird, sollte gegenüber den Richtungen nicht als nachrangig betrachtet werden.

Weitere methodische Erkenntnisse beziehen sich auf die verwendeten Maße und deren Aussagekraft für die Beherrschbarkeit von kombinierten Eingriffen. Da die Verhaltensmaße der Realfahrtstudie im

Wesentlichen das Lenkverhalten der Probanden beschreiben, konnten Auswirkungen der lateralen Eingriffskomponente besonders gut erfasst werden. Zudem konnten auch Auswirkungen der longitudinalen Komponente anhand lateraler Verhaltensmaße nachvollzogen werden. An verschiedenen Stellen zeigten sich für Brems- und Beschleunigungseingriffe unterschiedlich große maximale Lenkradwinkel. Vereinzelt traten Auswirkungen der longitudinalen Eingriffsintensität in den zugelassenen Auslenkungen auf. Daran lassen sich Manipulationen der Längsführung in einem genuin lateralen Verhaltensmaß nachvollziehen. Die Auswirkungen der Eingriffskomponenten zeigen sich hiermit im gesamten Fahrer-Fahrzeug-System und sind nicht auf die jeweiligen lateralen oder longitudinalen Komponenten begrenzt.

Ferner konnten anhand des maximalen Lenkradwinkels nicht nur die tatsächlichen Auswirkungen der Eingriffskombinationen festgestellt werden. Verschiedene Ergebnismuster legen den Schluss nahe, dass sich innerhalb dieses Maßes auch kompensatorische Verhaltensmuster zeigen. Besonders deutlich wird dieser Befund innerhalb des Kurvenszenarios. Hier wird das „aus der Kurve heraus beschleunigen“ gegenüber anderen Eingriffen als störender bewertet, aber zugleich aufmerksamer beherrscht als weniger störende Manipulationen. Die maximal zugelassenen Auslenkungen sind hier niedriger und deuten damit auf eine verbesserte Reaktion hin. Vergleichbare kompensatorische Reaktionen zeigen sich zudem häufig in der Geschwindigkeit, mit der die Auslenkungen durch den Fahrer abgefangen werden.

An verschiedenen Stellen ist der Versuch unternommen worden, einen direkten Bezug zwischen den subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen und den resultierenden Fahrzeugreaktionen herzustellen. Werden die mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigung im Rahmen einer Varianzanalyse untersucht, zeigen sich Parallelen zu den Bewertungsmustern der Eingriffskombinationen. Das Ausmaß, in dem eine Eingriffskombination als störend empfunden wird, lässt sich zumindest augenscheinlich an den Ausprägungen der Spannweiten nachvollziehen. Dennoch können für die mittleren resultierenden Fahrzeugreaktionen und die Störungsbewertungen häufig auch abweichende Haupteffekte bzw. Wechselwirkungen festgestellt werden. Eine direkte Entsprechung findet sich durch dieses Vorgehen nicht.

Insgesamt zeigt sich bei dieser Betrachtung, dass sich die Eigenschaften der jeweiligen Eingriffskomponenten in den zugehörigen Kennwerten niederschlagen. Effekte von Richtung und Intensität der Lenkeingriffe finden sich in den Spannweiten der Gierrate, während die longitudinalen Variationen eher anhand der Spannweite der Längsbeschleunigung festgestellt werden können. Dieses Muster bestätigt im Wesentlichen die Wirksamkeit der experimentellen Variationen. Demgegenüber stellen die Störungsbewertungen ein eher integratives Maß dar. Hier können die Auswirkungen beider Komponenten beobachtet werden.

Vor diesem Hintergrund erscheinen die geringen Zusammenhänge, die in einem ersten Schritt durch die getrennte Korrelation von Spannweite der Gierrate und Störungsbewertungen bzw. Spannweite der Längsbeschleunigung und Störungsbewertung gefunden wurden, verständlich. Die Ergebnisse der bivariaten Korrelationen zeigen verhältnismäßig geringe Zusammenhänge. Das subjektive Erleben eines

teilautomatisierten Eingriffs konnte damit nur sehr unzureichend durch einen einzelnen fahrdynamischen Kennwert erklärt oder vorhergesagt werden. Eine weitere Ursache für die relativ schwachen Beziehungen kann zudem in der verwendeten Berechnungsmethode gesucht werden. Im Unterschied zu den in der Literatur berichteten Analysen (Schmidt, 2009) wurden in diesem Arbeitsschritt zunächst die Rohdaten miteinander korreliert.

Durch einen veränderten Untersuchungsansatz konnte dennoch eine Beziehung zwischen dem subjektiven Erleben und den resultierenden Fahrzeugreaktionen aufgezeigt werden. Zum einen wurde der Einfluss beider Variablen auf die Störungsbewertungen berücksichtigt, indem die Zusammenhänge durch eine multiple Regression bestimmt wurden. Zum anderen wurden nicht die Rohdaten zur Berechnung verwendet, sondern übergreifende Kategorien gebildet. Hierbei wurden für die 16 untersuchten Eingriffskombinationen die mittleren Spannweiten der Gierrate, die mittleren Spannweiten der Längsbeschleunigung und die mittleren Störungsbewertungen berechnet. Durch diesen Ansatz konnte eine wesentliche Verbesserung der Vorhersage erreicht werden (58% Varianzaufklärung).

Da die vorhergehenden Analysen Unterschiede zwischen den Bewertungsmustern von Eingriffskombinationen mit positiver und negativer Beschleunigung feststellen konnten, wurden auch getrennte Analysen vorgenommen. Dieser Ansatz konnte die Vorhersage der subjektiven Auswirkungen durch die resultierenden Fahrzeugreaktionen weiter verbessern. Insbesondere für Eingriffskombinationen mit positiver Beschleunigungskomponente konnten die Spannweiten beider Maße als äußerst effektive Prädiktoren identifiziert werden (90% Varianzaufklärung). Eingriffe mit Verzögerungskomponenten lassen sich hingegen schlechter durch die Spannweiten vorhersagen (64% Varianzaufklärung). Zusammenhänge dieser Intensität entsprechen eher den Ergebnissen aus dem Bereich der lateralen Assistenz (Varianzaufklärungen zwischen 87 und 92% nach Schmidt, 2009) und weisen auf stabile Wahrnehmungs- bzw. Urteilsmuster hin.

Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die Bedeutung der Quer- und Längskomponente in beiden Kombinationstypen unterschiedlich ist. Liegen positive Beschleunigungen vor, reagieren Fahrer sehr sensitiv auf zusätzliche Eingriffe in die Querführung. Mit einer Verzögerungskomponente tritt dieser Trend nicht auf, da hier die Eingriffe in die Längsführung wichtiger für die Wahrnehmung sind. Diese Untersuchungsansätze betreffen vor allem die in Kapitel 3 aufgeworfenen Fragen nach der Identifikation möglicher Führungsgrößen in der Wahrnehmung von kombinierten Eingriffen in die Quer- und Längsführung (Frage 8).

Nachfolgende Studien können die hier verwendeten Ansätze und Ergebnisse in verschiedenen Punkten weiter verbessern. Ein wichtiger Kritikpunkt bezieht sich auf die untersuchte Stichprobe. Zwar handelte es sich hierbei um „Normalfahrer“ ohne besondere Fahrausbildung oder übermäßige Erfahrung im Umgang mit besonderen Fahrszenarien. Von einer besonders ausgeprägten Fähigkeit im Umgang mit dynamischen Fahrsituationen muss demnach nicht ausgegangen werden. Gerade dieses mittlere Maß an Erfahrung bringt jedoch auch gewisse Einschränkungen mit sich, da nicht die Reaktionen besonders leistungsschwacher Fahrer untersucht wurden. Insbesondere diese Subpopulation ist für die Bewertung der Beherrschbarkeit jedoch besonders interessant, da hierdurch das gesamte System „Fahrer-

Fahrzeug-Umwelt“ einer „Worst-Case“-Betrachtung unterzogen werden kann. Folgende Untersuchungen, die eher eine tatsächliche Absicherung bestimmter Funktionalitäten zum Ziel haben, sollten daher schwächere Fahrergruppen mit in die Betrachtung einbeziehen.

Neben der Stichprobe kann auch der verwendete Untersuchungsansatz diskutiert werden. Die oben beschriebenen Erlebens- und Verhaltensmuster basieren auf Wiederholungsmessungen. Die jeweiligen Ereignisse der Simulator- und Realfahrtstudie traten damit mehrmals auf und stellten kein einmaliges und seltenes Ereignis dar, wie es unter normalen Bedingungen wahrscheinlicher wäre. Die Probanden konnten sich daher in gewissem Maße auf systembasierte Ereignisse vorbereiten und unter Umständen bereits Handlungsroutrinen ausbilden. Obwohl diesem Problem aus versuchsökonomischen Gründen nur schwer begegnet werden kann, ist dennoch eine stärkere Variation der Versuchsdurchführung bzw. der Darbietung der einzelnen Ereignisse denkbar. Möglich wäre zum Beispiel, einzelnen Versuchspersonen unterschiedliche Arten von systembasierten Ereignissen darzubieten und zusätzlich Phasen einzuführen, in denen gar keine Störungen auftreten. Eine unregelmäßige Darbietung relevanter Aspekte sollte eine schnelle Adaption an die Versuchsbedingungen erschweren.

Des Weiteren kann die Beschreibung des Fahrerverhaltens im Umgang mit kombinierten Eingriffen weiter verbessert werden. Die hier besprochenen Verhaltensmaße beziehen sich, insbesondere innerhalb der Fahrstudie, nahezu ausschließlich auf Maße der Lenkung. Die Betrachtung weiterer, longitudinaler Verhaltensmaße, wie z. B. pedaleriebezogene Intensitäten und Reaktionszeiten können das Bild der Fahrerreaktionen sinnvoll ergänzen. So könnten verbesserte Bremsreaktionen einen besseren Aufschluss über weitere kompensatorische Reaktionen geben. Diese Betrachtung setzt jedoch auch eine Adaption des Untersuchungsansatzes voraus. Würden Probanden instruiert, die einsetzenden Beschleunigungen so schnell wie möglich zu stoppen, könnten nur sehr schwer stärkere Fahrzeugreaktionen erzeugt werden.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Intensität, mit der in die Fahrzeugführung eingegriffen wurde. Die Störungsbewertungen der Probanden deuten darauf hin, dass stärkere Intensitäten oder andere Signalformen nötig sind, um höhere mittlere Störungsbewertungen zu erreichen. Obwohl gerade bei noch neuen Evaluationskonzepten eher moderate Eingriffe in die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu empfehlen sind, können zu anderen Bereichen nur eingeschränkte Aussagen getroffen werden. Die obigen Vorhersagen der Störungsbewertungen durch die Spannweite der Gierrate und der Längsbeschleunigung basieren auf den Bewertungsmustern des mittleren Skalenbereichs. Eine Vorhersage des Erlebens in den Maximalbereichen der Störungsbewertungsskala anhand des formulierten Ausdrucks setzt dabei einen konstanten Bewertungstrend voraus. Hierzu wäre eine komplette experimentelle Absicherung wünschenswert.

Im Hinblick auf folgende Untersuchungen muss auch der hier verfolgte Analyseansatz hinterfragt werden. Obwohl die Anzahl der wirkenden Faktoren und deren Ausprägungen bereits deutlich begrenzt wurden, erweist sich deren Variation in zwei Dimensionen (Quer- und Längsführung) als sehr komplex. Sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Interpretation der anfallenden Daten stellt eine große Herausforderung dar. Folgende Untersuchungen könnten sich daher auf einzelne, besonders relevante

Kombinationen konzentrieren. Welche Auswirkungen sich durch variierende Randbedingungen ergeben, kann dann zudem durch Studienreihen geklärt werden.

Die Tatsache, dass die Aufdeckung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen schon im Bereich der teilautomatisierten Systeme sehr komplexe Untersuchungsansätze erfordert, weist zudem auf ein weiteres Problem hin. Die oben beschriebenen Ergebnisse haben gezeigt, dass eine einfache Extrapolation bisher bekannter Effekte nicht ausreicht, um die Beherrschbarkeit neuer Systeme vorherzusagen. Ergebnisse, die für den Bereich der lateralen Assistenz erarbeitet wurden, können aufgrund der gleichzeitigen Eingriffe in die Längsführung nicht ohne weiteres auf teilautomatisierte Systeme übertragen werden. Im Hinblick auf zukünftige Systeme ergeben sich daher weitere Fragen. Höher automatisierte Fahrfunktionen werden die Möglichkeiten aktueller Systeme übersteigen. Dabei ist von längeren Einsatzzeiten, besseren Verfügbarkeiten und der Bewältigung von noch komplexeren Fahrsituationen auszugehen. Sehr seltene Ausfälle und Systemgrenzen dürften zudem ein hohes Maß an Systemvertrauen und möglicherweise Reliance-Effekte zur Folge haben. Vor diesem Hintergrund erscheinen die bisher verwendeten Untersuchungsansätze für höher automatisierte Fahrfunktionen fraglich. Wie Fahrer im alltäglichen Gebrauch auf unerwartete Ereignisse reagieren, wird sich durch die isolierte Prüfung kurzfristiger Eingriffe nur unzureichend einschätzen lassen. Hieran wird deutlich, dass die Bewertung zukünftiger Funktionen und der Einsatz zielführender Untersuchungskonzepte noch mit vielen offenen Fragen verbunden sind, die weitere Forschungsarbeiten erfordern.

8 Literaturverzeichnis

- Adams, M.J., Tenny Y.J., & Pew, R.W. (1995). Situation Awareness and the cognitive management of complex systems. *Human Factors*, 37(1), 85-104.
- Abendroth, B., & Bruder, R. (2009). Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In: H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (4-14). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Aktiv-Abschlussbericht. "Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr" gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Internes Dokument (2011).
- Braess, H.-H., & Donges, E. (2006, April). *Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen – „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen?* Artikel präsentiert auf der 2. Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“, TU München, Garching bei München.
- Bubb, H. (2003). Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? *VDI-Bericht*, 1768, 257 – 268. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Breuer, J. (2009). Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (55- 68). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Daschner, D., Gwehenberger, J., Schwarz, S., Wermuth, G., Schönfelder, M., & Hofmann, F. (2009). Unfallstruktur- und Wirkpotenzialanalysen zu den AKTIV-Applikationen auf der Basis von Pkw-Haftpflichtschäden mit Personenschaden. *Forschungsprojekt AKTIV-AS*. Online verfügbar unter http://schwarz.userweb.mwn.de/PUBLIC/HM/forschungsbericht_fas_pkw_v1.0.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2013.
- Damböck, D., Farid, M., Tönert, L., & Bengler, K. (2012). *Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Autofahren*. Artikel präsentiert auf der 5. Tagung Fahrerassistenz, München.
- Donges, E. (2009). Fahrerverhaltensmodelle. In: H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (15-23). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27, 183–190.
- Donner, E., Winkle, T., Walz, R., & Schwarz, J. (2007, März). *RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen*. VDA. Technischer Kongress, Sindelfingen.
- Durso, F.T., & Gronlund, P. (1999). Situation Awareness. In: F.T. Durso & R. Nickerson, R. Schvaneveldt, S. Dumais, S. Lindsay, & M. Chi (Hrsg.). *Handbook of applied cognition* (283-314). New York: John Wiley & Sons.

- Endsley, M.R. (1988). Situation Awareness global assessment technique (SAGAT). *Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, 789-759. New York: IEEE.
- Endsley, M. R. (1995b). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Endsley, M.R. (1996). Automation and situation awareness. In: R. Parasuraman & M. Mouloua (Hrsg.). *Automation and Human performance: Theory and applications* (163-181). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Endsley, M.R., & Kaber, D.B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- Fach, M., Baumann, F., Breuer, J., May A., & Mücke, S. (2011). Beherrschbarkeitsuntersuchung bei der Absicherung von Fahrerassistenzsystemen. In: R. Bruder & H. Winner (Hrsg.). *Zukunft der Fahrzeugführung kooperativ oder autonom? 5. Darmstädter Kolloquium* (13 –21). Stuttgart: ergonomia.
- Fastenmeier, W., Stadler, P., & Lernen, G. (1995). Situationsbezogene Fahrerunterstützung durch ACC. In W. Fastenmeier (Hrsg.). *Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme* (33,181-197). Köln: TÜV Rheinland.
- Gilson, R. D. (1995). Situation Awareness – Special Issue Preface. *Human Factors*, 37 (1), 3-4.
- Gasser, T., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., & Vogt, W. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung - Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Bergisch-Gladbach.
- Gasser, T. (2012). Legal Issues of Driver Assistance Systems and Autonomous Driving. In A. Eskandarian (Hrsg.). *Handbook of Intelligent Vehicles* (1519–1535). London: Springer.
- Hauß, Y., & Timpe, K.-P. (2000). Automatisierung und Unterstützung im Mensch-Maschine-System. In K.-P. Timpe, T. Jürgensohn, & H. Kolrep (Hrsg.). *Mensch-Maschine-Systemtechnik* (41-60). Düsseldorf: Symposion Publishing.
- Hoc, J.-M., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, E., Netto, M., & Blosseville, J.-M. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: Delegation and mutual control. *Le Travail Humain*, 69(2), 253-182.
- Hoffmann, S., Krüger, H.-P., & Buld, S. (2003). Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.). *Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten*, 1745, 385-404. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (2005). *Joint cognitive systems: Foundation of cognitive systems engineering*. Boca Raton, FL: Taylor and Francis / CRC Press.

- Kleen, A., & Vollrath, M. (2012, Oktober). Beherrschbarkeit von komplexen Eingriffen in die Fahrzeugführung. In: VDI Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.). *Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*. 27. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Kraiss, K.-F. (1998). Benutzergerechte Automatisierung – Grundlagen und Realisierungskonzepte. *at – Automatisierungstechnik* 46 (10), 457–467.
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46(1), 50-80.
- Liebing, A. (2009). *Ein Untersuchungsansatz zur Beherrschbarkeit von Fahrerassistenzsystemen* (nichtveröffentlichte Studienarbeit). Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Maurer, M. (2009). Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: H. Winner, S. Hakuli, & G. Wolf (Hrsg.). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (43-54). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Mühlbacher, D., Maag, C., & Krüger, H.-P. (2011). Die Pulksimulation als neue Methode zur Erfassung der Wirkung von Car2X-basierten Fahrerassistenzsystemen. In M. Maurer, K. Dietmayer, B. Färber, C. Stiller & H. Winner (Hrsg.). *7. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS2011* (64-74). Darmstadt: Uni-DAS e.V..
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*. New York: WH Freeman/Times Books/Henry Holt & Co.
- Neukum, A., Krüger, H.-P., & Schuller, J. (2001). Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? In VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.). *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI-Berichte, 1613 (13 - 32). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Neukum, A., & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.). *Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn*. VDI-Berichte, 1791. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C., & Steinle, J. (2008). ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In: M. Maurer, & C. Stiller (Hrsg.). *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2008* (141-150). Karlsruhe: fmrt.
- Neukum, A., Leonhard, A., Lübbecke, T., Ufer, E., Krüger, H.-P., Engels, F., & van der Jagd, P. (2009). Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems. In VDI Berichte (Hrsg.). *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. Braunschweig, 4. und 5. November. VDI Wissensforum GmbH (107–124). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Nilsson, L. (2005). Automated driving does not work without the involvement of the driver. In: G. Underwood (Hrsg.). *Traffic and transport psychology: theory and application*. Tagungsband ICTTP 2004 (273-301). London: Elsevier Ltd.
- Parasuraman, R., Mouloua, M., & Molloy, R. (1996). Effects of adaptive task allocation on monitoring of automated systems. *Human Factors*, 38(4), 665-679.

- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 39(2), 230-253.
- Parasuraman, R., & Wickens, C.D. (2008). Humans: Still vital after all these years of automation. *Human Factors: Golden Anniversary Special Issue*, 50(3), 511-520
- Popken, A. (2009). *Drivers' reliance on lane keeping assistance systems as a function of the level of assistance* (Dissertation). Online verfügbar unter http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/5973/data/DISS_POPKEN_FINAL_v3Online_geschuetzt.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2013.
- PREVENT (2009). RESPONSE 3 - Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS. Hg. v. ACEA. Online verfügbar unter http://www.acea.be/images/uploads/files/20090831_Code_of_Practice_ADAS.pdf, zuletzt geprüft am 28.06.2012.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 13 (3), (257–266).
- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext* (Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg). Online verfügbar unter: http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/izvw/texte/2009_Rauch_Diss.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013
- Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1991). Situation awareness: A critical but ill-defined phenomenon. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 45-57.
- Schmidt, G. (2009). *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente* (Dissertation, Dt. Zentrum für Luft-und Raumfahrt, Inst. für Verkehrssystemtechnik). Online verfügbar unter: http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00007645/schmidtg_dissertation.pdf;jsessionid=08813B5235023BD64074EB471BAB16B7, zuletzt geprüft am 23.10.2013
- Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge: MIT Man-Machine Systems Laboratory.
- Smith, K., & Hancock, P. A. (1995). Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 137-148.
- Stanton, N. A.; Chambers, P. R. G. & Piggott, J. (2001) Situational awareness and safety. *Safety Science* 39 189-204. Online verfügbar unter: http://dspace.brunel.ac.uk/bitstream/2438/1804/1/Situation_awareness_and_safety_Stanton_et_al.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2013
- Stanton, N.A., Salmon, P.M., Walker, G.H., Baber, C., & Jenkins, D. (2005). *Human factors methods: a practical guide for engineering and design*. Farnham, GB: Ashgate.
- Tönert, L., Farid, M., Schneller, R., & Bengler, K. (2011). Wahrnehmungs- und Verhaltensleistung des Fahrers bei einem Fahrzeug-Abdrift mit teil-automatisierter Querführung in unterschiedlich

kritischen Fahrsituationen. Methodischer Ansatz für die Absicherung der Beherrschbarkeit hochautomatisierter Systeme. *VDI-Berichte*, 2134.

Vollrath, M., & Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie. Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*, 1. Stuttgart: Kohlhammer.

Vortac, O. U., Edwards, M. B., Fuller, D. K., & Manning, C. A. (1993). Automation and cognition in air traffic control: An empirical investigation. *Applied cognitive psychology*, 7(7), 631-651.

Wegscheider, M., & Prokop, G. (2005). Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen. *VDI Berichte*, 1900, (17–36).

Zijlstra, F. R. H., & Van Doorn, L. (1985). *The construction of a subjective effort scale*. Delft: Delft University of Technology, report.

9 Anhang

Tabelle 60: Häufigkeiten der Eingriffsbilder für die Richtungskombinationen (Versuchsgruppen) und Fahrscenarien der Fahrstudie. „A“ und „B“ bezeichnen die Intensität der lateralen Komponente („A“ < „B“). Die Intensitäten der longitudinalen Komponente sind mit „0“, „I“ und „II“ gekennzeichnet („I“ < „II“). Bei longitudinalen Intensitäten der Stufe „0“ wurden keine Eingriffe in die Längsführung vorgenommen.

	Stärke	Beschleunigung mit Lenkeingriff nach links		Bremsmanöver mit Lenkeingriff nach links		Bremsmanöver mit Lenkeingriff nach rechts		Beschleunigung mit Lenkeingriff nach rechts		Gesamt
		A	B	A	B	A	B	A	B	
Gerade	0	11	12	5	11	5	7	11	12	74
	I	30	20	22	20	10	9	30	20	161
	II	19	32	20	21	9	13	19	32	165
Kurve	0	7	15	6	10	5	6	10	16	75
	I	28	14	20	17	11	7	20	16	133
	II	58	27	24	25	10	17	26	56	243
Fahr- streifen- wechsel	0	8	11	8	11	11	11	5	6	71
	I	23	21	23	21	21	18	12	22	161
	II	24	26	24	26	13	28	11	22	174
Eng- stelle	0	10	10	12	10	6	4	8	9	69
	I	33	19	17	19	16	9	33	22	168
	II	22	18	21	20	11	11	29	20	152
Gesamt		498		413		268		467		1646

Statistische Analysen und weitere Darstellungen zum Ergebnisteil der Geradeausfahrt (Kapitel 5.2.1)

Tabelle 61: Ergebnisse der multivariaten Tests für das Prüfszenario der Geradeausfahrt (Test: Pillai-Spur).

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Konstanter Term	.891	366.507 ^a	8.000	358.000	<.001	.891
Stärke des Längseingriffs	.340	23.074 ^a	8.000	358.000	<.001	.340
Stärke des Quereingriffs	.426	33.261 ^a	8.000	358.000	<.001	.426
Richtung des Quereingriffs	.588	63.744 ^a	8.000	358.000	<.001	.588
Richtung des Längseingriffs	.127	6.485 ^a	8.000	358.000	<.001	.127
Stärke des Längseingriffs *	.013	.568 ^a	8.000	358.000	.804	.013
Stärke des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.022	1.017 ^a	8.000	358.000	.423	.022
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.189	10.421 ^a	8.000	358.000	<.001	.189
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.214	12.181 ^a	8.000	358.000	<.001	.214
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.016	.732 ^a	8.000	358.000	.663	.016
Richtung des Längseingriffs						
Richtung des Quereingriffs *	.065	3.087 ^a	8.000	358.000	.002	.065
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.014	.631 ^a	8.000	358.000	.752	.014
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.005	.237 ^a	8.000	358.000	.984	.005
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.020	.913 ^a	8.000	358.000	.505	.020
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.016	.723 ^a	8.000	358.000	.671	.016
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.010	.463 ^a	8.000	358.000	.882	.010
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						

Tabelle 62: Störungsbewertungen - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfszenario der Geradeausfahrt.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	19	18.667	9.167	<.001	.323
Konstanter Term	1	3020.880	1483.577	<.001	.803
Stärke des Längseingriffs	1	115.290	56.620	<.001	.134
Stärke des Quereingriffs	1	145.084	71.252	<.001	.163
Richtung des Quereingriffs	1	.300	.147	.701	.000
Richtung des Längseingriffs	1	17.026	8.362	.004	.022
Stärke des Längseingriffs *	1	2.069	1.016	.314	.003
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	8.195	4.025	.046	.011
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	24.667	12.114	.001	.032
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.205	.101	.751	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	1.279	.628	.429	.002
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	16.389	8.049	.005	.022
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.070	.035	.853	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.276	.136	.713	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.648	.318	.573	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	1.068	.524	.469	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.008	.004	.949	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	2.036			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

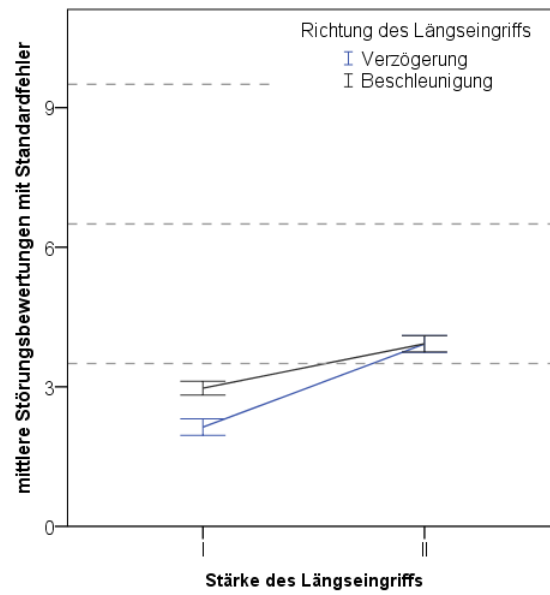


Abbildung 53: Darstellung der Interaktion von Stärke und Richtung der longitudinalen Komponente für die Störungsbewertungen.

Tabelle 63: Betrag des maximalen Lenkradwinkels der Geradeausfahrt - Tests der Zwischensubjekteffekte.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	19	55.070	7.596	<.001	.283
Konstanter Term	1	4079.123	562.661	<.001	.607
Stärke des Längseingriffs	1	8.485	1.170	.280	.003
Stärke des Quereingriffs	1	409.460	56.480	<.001	.134
Richtung des Quereingriffs	1	251.428	34.681	<.001	.087
Richtung des Längseingriffs	1	3.386	.467	.495	.001
Stärke des Längseingriffs *	1	.057	.008	.929	.000
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	18.362	2.533	.112	.007
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	10.651	1.469	.226	.004
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	130.978	18.067	<.001	.047
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	11.202	1.545	.215	.004
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	32.399	4.469	.035	.012
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.035	.005	.945	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.683	.370	.543	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.308	.042	.837	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	1.003	.138	.710	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.328	.183	.669	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	7.250			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

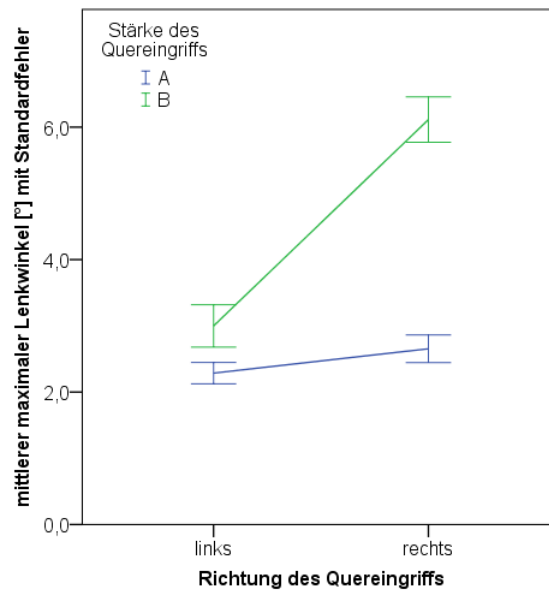


Abbildung 54: Darstellung der Interaktion von Stärke und Richtung der lateralen Komponente für den maximalen Lenkradwinkel.

Tabelle 64: Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels der Geradeausfahrt - Tests der Zwischensubjekteffekte.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	19	.362	.755	.760	.038
Konstanter Term	1	87.384	182.292	<.001	.333
Stärke des Längseingriffs	1	.005	.010	.919	.000
Stärke des Quereingriffs	1	.207	.432	.511	.001
Richtung des Quereingriffs	1	2.829	5.902	.016	.016
Richtung des Längseingriffs	1	.001	.001	.971	.000
Stärke des Längseingriffs *	1	.093	.193	.660	.001
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.010	.022	.883	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.272	.568	.451	.002
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.470	.981	.323	.003
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.327	.682	.409	.002
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.192	.400	.528	.001
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.368	.768	.382	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.067	.139	.710	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.103	2.302	.130	.006
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.177	.370	.544	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.029	.060	.807	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	.479			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

Tabelle 65: Spannweite der Gierrate der Geradeausfahrt - Tests der Zwischensubjekteffekte.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	19	16.896	15.680	<.001	.449
Konstanter Term	1	676.536	627.839	<.001	.632
Stärke des Längseingriffs	1	3.922	3.640	.057	.010
Stärke des Quereingriffs	1	225.562	209.326	<.001	.364
Richtung des Quereingriffs	1	5.770	5.355	.021	.014
Richtung des Längseingriffs	1	3.329	3.089	.080	.008
Stärke des Längseingriffs *	1	1.701	1.578	.210	.004
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.553	.513	.474	.001
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.050	.047	.829	.000
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	7.998	7.423	.007	.020
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.003	.003	.958	.000
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.615	.571	.450	.002
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.618	.574	.449	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.446	.414	.520	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.226	.210	.647	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.026	.024	.876	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.402	.373	.541	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	1.078			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

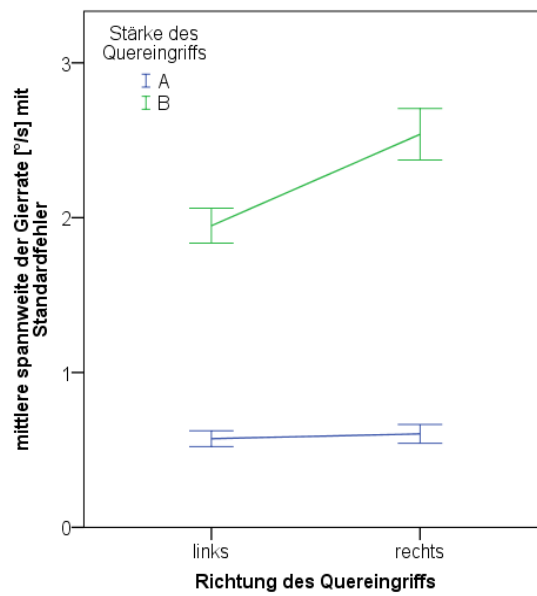


Abbildung 55: Darstellung der Interaktion von Stärke und Richtung innerhalb der lateralen Eingriffskomponente für die Spannweite der Gierrate.

Tabelle 66: Spannweite der Längsbeschleunigung der Geradeausfahrt - Tests der Zwischensubjekteffekte.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	19	4.801	19.069	<.001	.498
Konstanter Term	1	349.846	1389.561	<.001	.792
Stärke des Längseingriffs	1	39.373	156.387	<.001	.300
Stärke des Quereingriffs	1	.303	1.203	.273	.003
Richtung des Quereingriffs	1	.704	2.795	.095	.008
Richtung des Längseingriffs	1	3.044	12.090	<.001	.032
Stärke des Längseingriffs *	1	.059	.233	.630	.001
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.001	.002	.964	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	15.812	62.803	< .001	.147
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.417	1.657	.199	.005
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.120	.476	.491	.001
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.306	1.217	.271	.003
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.039	.154	.695	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.224	.890	.346	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.498	1.976	.161	.005
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.144	.573	.450	.002
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.045	.178	.673	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	.252			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

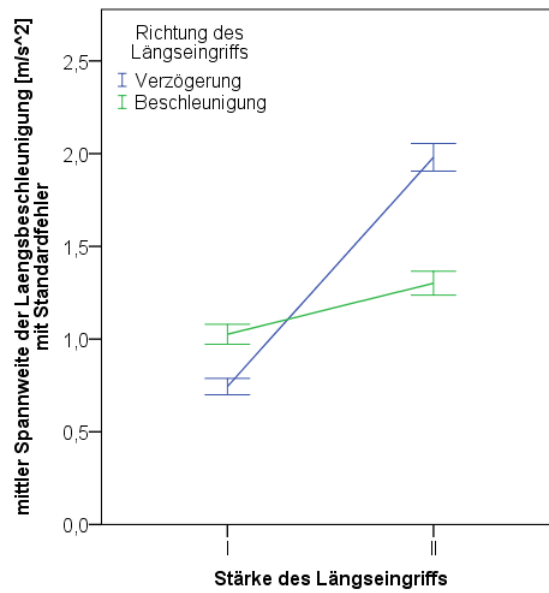


Abbildung 56: Darstellung der Interaktion von Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für die Spannweite der Längsbeschleunigung.

Statistische Analysen und weitere Darstellungen zum Ergebnisteil der Kurvenfahrt (Kapitel 5.2.2)

Tabelle 67: Ergebnisse der multivariaten Tests für das Prüfzenario der Kurvenfahrt (Test: Pillai-Spur).

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Konstanter Term	.970	1429.181	8.000	358.000	<.001	.970
Stärke des Längseingriffs	.302	19.334a	8.000	358.000	<.001	.302
Stärke des Quereingriffs	.300	19.161a	8.000	358.000	<.001	.300
Richtung des Quereingriffs	.635	77.695a	8.000	358.000	<.001	.635
Richtung des Längseingriffs	.412	31.350a	8.000	358.000	<.001	.412
Stärke des Längseingriffs *	.022	.991a	8.000	358.000	.442	.022
Stärke des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.040	1.887a	8.000	358.000	.061	.040
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.134	6.950a	8.000	358.000	<.001	.134
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.208	11.773a	8.000	358.000	<.001	.208
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.047	2.189a	8.000	358.000	.028	.047
Richtung des Längseingriffs						
Richtung des Quereingriffs *	.200	11.180a	8.000	358.000	<.001	.200
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.011	.504a	8.000	358.000	.853	.011
Stärke des Quereingriffs*						
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.016	.738a	8.000	358.000	.658	.016
Stärke des Quereingriffs						
*Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.055	2.602a	8.000	358.000	.009	.055
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.058	2.734a	8.000	358.000	.006	.058
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.037	1.743a	8.000	358.000	.087	.037
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Quereingriffs						
Richtung des Längseingriffs						

Tabelle 68: Störungsbewertungen - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfszenario der Kurvenfahrt.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	19	20.342	8.071	<.001	.296
Konstanter Term	1	3984.321	1580.849	<.001	.812
Stärke des Längseingriffs	1	70.636	28.026	<.001	.071
Stärke des Quereingriffs	1	93.459	37.082	<.001	.092
Richtung des Quereingriffs	1	36.949	14.660	<.001	.039
Richtung des Längseingriffs	1	72.635	28.819	<.001	.073
Stärke des Längseingriffs *	1	3.601	1.429	.233	.004
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	3.827	1.519	.219	.004
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.178	.070	.791	.000
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	6.617	2.625	.106	.007
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	3.342	1.326	.250	.004
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	10.860	4.309	.039	.012
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.617	.245	.621	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.115	.839	.360	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.288	.511	.475	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.189	.075	.784	.000
Richtung des Quereingriffs					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	5.666	2.248	.135	.006
Stärke des Quereingriffs					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	2.520			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

Tabelle 69: Betrag des maximalen Lenkradwinkels - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Kurvenfahrt.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	176.539	11.950	<.001	.384
Konstanter Term	1	108296.346	7330.798	<.001	.953
Stärke des Längseingriffs	1	18.121	1.227	.269	.003
Stärke des Quereingriffs	1	107.999	7.311	.007	.020
Richtung des Quereingriffs	1	140.239	9.493	.002	.025
Richtung des Längseingriffs	1	1152.953	78.046	<.001	.176
Stärke des Längseingriffs *	1	30.598	2.071	.151	.006
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	51.668	3.498	.062	.009
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	128.824	8.720	.003	.023
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	579.080	39.199	<.001	.097
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.947	.064	.800	.000
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	180.486	12.217	.001	.032
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.265	.086	.770	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	7.663	.519	.472	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.935	.131	.718	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	13.915	.942	.332	.003
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.005	.000	.986	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	14.773			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

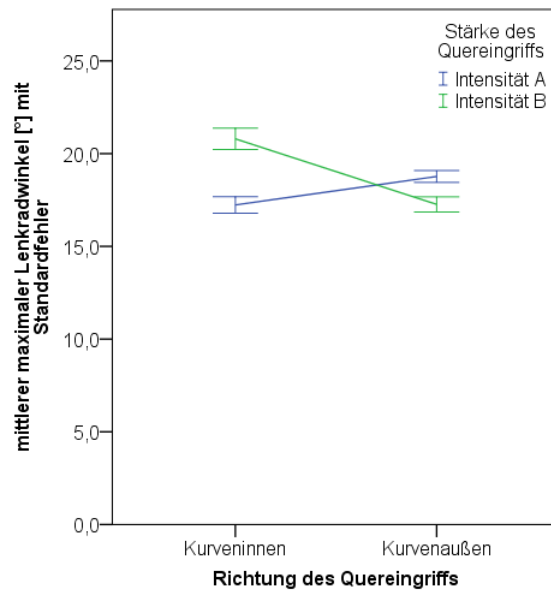


Abbildung 57: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der lateralen Eingriffskomponente für den mittleren maximalen Lenkradwinkel.

Tabelle 70: Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Kurvenfahrt.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	3.038	12.704	<.001	.398
Konstanter Term	1	40.705	170.232	<.001	.318
Stärke des Längseingriffs	1	3.619	15.136	<.001	.040
Stärke des Quereingriffs	1	.005	.020	.887	<.001
Richtung des Quereingriffs	1	13.902	58.140	<.001	.137
Richtung des Längseingriffs	1	11.787	49.295	<.001	.119
Stärke des Längseingriffs *	1		.002	.966	<.001
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.906	7.971	.005	.021
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	4.076	17.046	<.001	.045
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	3.271	13.680	<.001	.036
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	3.410	14.260	<.001	.038
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	9.468	39.598	<.001	.098
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.147	.614	.434	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.042	.176	.675	< .001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	3.178	13.289	<.001	.035
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	4.691	19.619	<.001	.051
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.080	.337	.562	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	.239			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

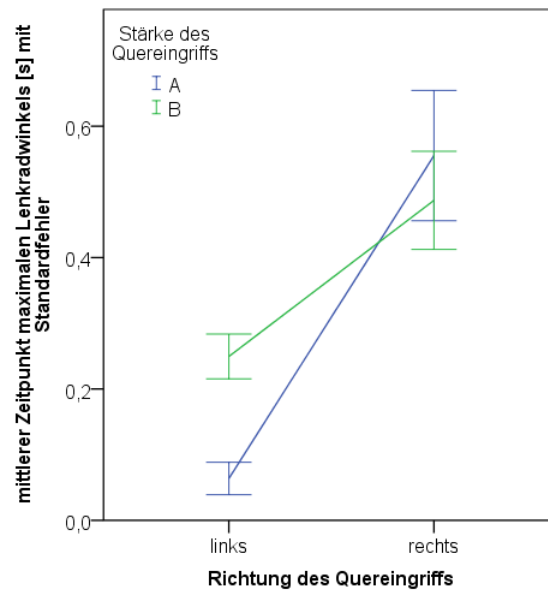


Abbildung 58: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der lateralen Eingriffskomponente für den Zeitpunkt des mittleren maximalen Lenkwinkels.

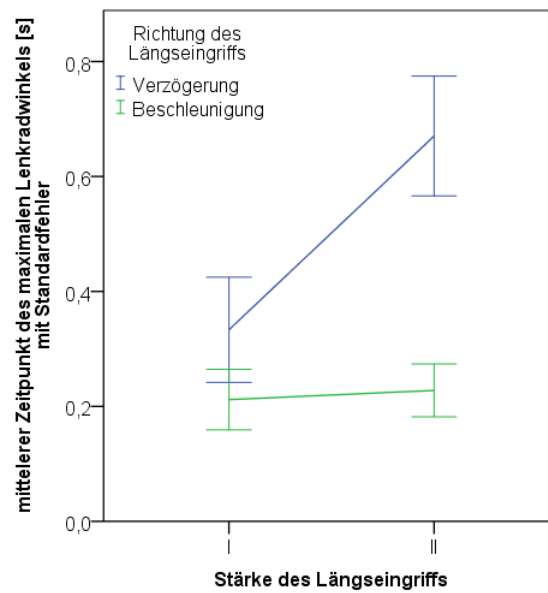


Abbildung 59: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für den Zeitpunkt des mittleren maximalen Lenkwinkels.

Tabelle 71: Spannweite der Gierrate - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Kurvenfahrt.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	18.247	13.817	<.001	.418
Konstanter Term	1	727.969	551.242	<.001	.602
Stärke des Längseingriffs	1	14.631	11.079	.001	.029
Stärke des Quereingriffs	1	171.298	129.713	<.001	.262
Richtung des Quereingriffs	1	35.788	27.100	<.001	.069
Richtung des Längseingriffs	1	1.103	.835	.361	.002
Stärke des Längseingriffs *	1	.157	.119	.730	.000
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.145	.110	.740	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	5.903	4.470	.035	.012
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	13.951	10.565	.001	.028
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.526	.398	.529	.001
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	7.516	5.692	.018	.015
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.156	.118	.732	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.105	.079	.779	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.775	.587	.444	.002
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	3.642	2.758	.098	.007
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.736	1.315	.252	.004
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	1.321			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

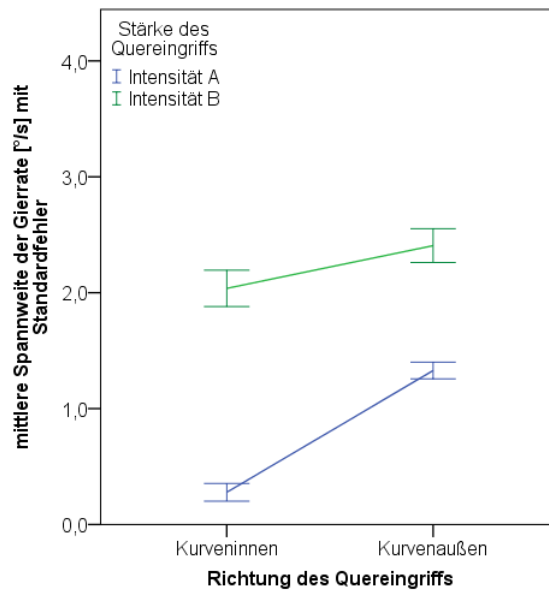


Abbildung 60: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der lateralen Eingriffskomponente für die Spannweite der Gierrate.

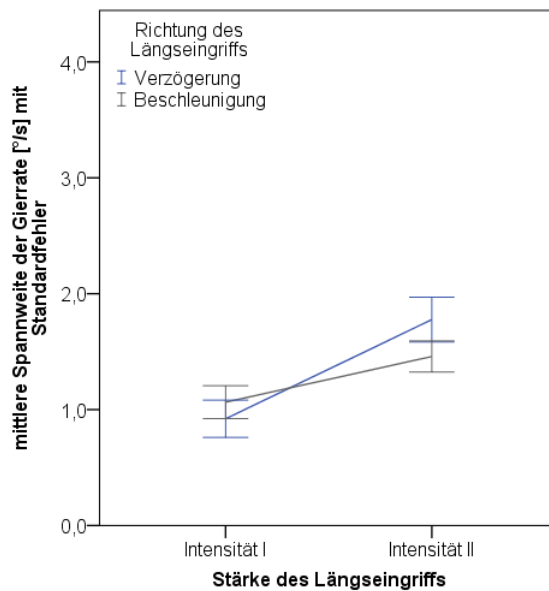


Abbildung 61: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für die Spannweite der Gierrate.

Tabelle 72: Spannweite der Längsbeschleunigung - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfszenario der Kurvenfahrt.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	5.382	15.107	<.001	.440
Konstanter Term	1	361.825	1015.594	<.001	.736
Stärke des Längseingriffs	1	40.142	112.672	<.001	.236
Stärke des Quereingriffs	1	1.207	3.389	.066	.009
Richtung des Quereingriffs	1	1.895	5.320	.022	.014
Richtung des Längseingriffs	1	2.855	8.015	.005	.021
Stärke des Längseingriffs *	1	.042	.119	.730	.000
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.336	.944	.332	.003
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.258	6.339	.012	.017
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.215	.604	.438	.002
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.348	.977	.324	.003
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	2.601	7.302	.007	.020
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.043	.120	.729	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.113	.317	.574	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.093	.262	.609	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.023	.063	.802	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.322	.904	.342	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	365	.356			
Gesamt	385				
Korrigierte Gesamtvariation	384				

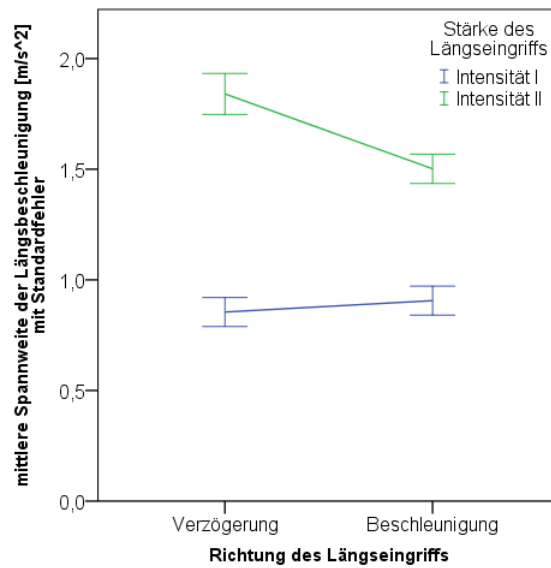


Abbildung 62: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für die Spannweite der Längsbeschleunigung.

Statistische Analysen und weitere Darstellungen zum Ergebnisteil der Engstelle (Kapitel 5.2.3)

Tabelle 73: Ergebnisse der multivariaten Tests für das Prüfzenario der Engstelle (Test: Pillai-Spur).

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Konstanter Term	.906	419.435 ^a	8.000	350.000	<.001	.906
Stärke des Längseingriffs	.347	23.219 ^a	8.000	350.000	<.001	.347
Stärke des Quereingriffs	.404	29.595 ^a	8.000	350.000	<.001	.404
Richtung des Quereingriffs	.721	113.025 ^a	8.000	350.000	<.001	.721
Richtung des Längseingriffs	.109	5.338 ^a	8.000	350.000	<.001	.109
Stärke des Längseingriffs *	.013	.581 ^a	8.000	350.000	.794	.013
Stärke des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.022	1.001 ^a	8.000	350.000	.435	.022
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.194	10.561 ^a	8.000	350.000	<.001	.194
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.349	23.442 ^a	8.000	350.000	<.001	.349
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.031	1.391 ^a	8.000	350.000	.199	.031
Richtung des Längseingriffs						
Richtung des Quereingriffs *	.212	11.759 ^a	8.000	350.000	<.001	.212
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.004	.191 ^a	8.000	350.000	.992	.004
Stärke des Quereingriffs*						
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.008	.350 ^a	8.000	350.000	.946	.008
Stärke des Quereingriffs						
*Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.019	.837 ^a	8.000	350.000	.570	.019
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.020	.913 ^a	8.000	350.000	.506	.020
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.008	.344 ^a	8.000	350.000	.948	.008
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Quereingriffs						
Richtung des Längseingriffs						

Tabelle 74: Störungsbewertungen - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Engstelle.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	17.209	7.857	<.001	.295
Konstanter Term	1	3342.544	1526.148	<.001	.810
Stärke des Längseingriffs	1	40.712	18.588	<.001	.049
Stärke des Quereingriffs	1	205.955	94.036	<.001	.208
Richtung des Quereingriffs	1	9.844	4.495	.035	.012
Richtung des Längseingriffs	1	5.197	2.373	.124	.007
Stärke des Längseingriffs *	1	2.499	1.141	.286	.003
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.050	.023	.880	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.196	1.003	.317	.003
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	9.994	4.563	.033	.013
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.112	.051	.821	.000
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	8.950	4.086	.044	.011
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.130	.059	.808	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.342	.156	.693	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.252	.115	.735	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.423	.193	.660	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.623	1.198	.275	.003
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	357	2.190			
Gesamt	377				
Korrigierte Gesamtvariation	376				

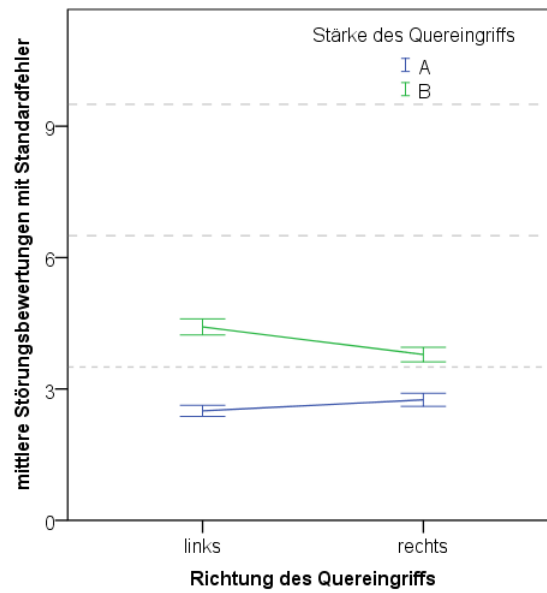


Abbildung 63: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der lateralen Eingriffskomponente für die Störungsbewertungen.

Tabelle 75: Maximaler Lenkradwinkel (Betrag) - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Engstelle.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	35.717	3.538	<.001	.158
Konstanter Term	1	2539.987	251.580	<.001	.413
Stärke des Längseingriffs	1	.579	.057	.811	.000
Stärke des Quereingriffs	1	126.370	12.517	<.001	.034
Richtung des Quereingriffs	1	66.785	6.615	.011	.018
Richtung des Längseingriffs	1	13.658	1.353	.246	.004
Stärke des Längseingriffs *	1	5.499	.545	.461	.002
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.119	.012	.914	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.444	.044	.834	.000
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	15.893	1.574	.210	.004
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.472	.047	.829	.000
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	229.999	22.781	<.001	.060
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.029	.201	.654	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.382	.137	.712	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	9.872	.978	.323	.003
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	33.667	3.335	.069	.009
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	3.205	.317	.574	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	357	10.096			
Gesamt	377				
Korrigierte Gesamtvariation	376				

Tabelle 76: Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels (Betrag) - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Engstelle.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	.401	2.367	.001	.133
Konstanter Term	1	20.815	122.733	<.001	.296
Stärke des Längseingriffs	1	.160	.943	.332	.003
Stärke des Quereingriffs	1	.050	.292	.589	.001
Richtung des Quereingriffs	1	.005	.031	.860	.000
Richtung des Längseingriffs	1	.181	1.069	.302	.004
Stärke des Längseingriffs *	1	.056	.328	.567	.001
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.145	.857	.355	.003
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.843	4.972	.027	.017
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.396	2.334	.128	.008
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	2.168	12.784	< .001	.042
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.908	5.355	.021	.018
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.122	.718	.398	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.881	5.195	.023	.017
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.210	1.239	.267	.004
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.146	.862	.354	.003
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.104	.611	.435	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	292	.170			
Gesamt	312				
Korrigierte Gesamtvariation	311				

Tabelle 77: Spannweite der Gierrate - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Engstelle.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	12.898	6.972	<.001	.271
Konstanter Term	1	919.565	497.059	<.001	.582
Stärke des Längseingriffs	1	.059	.032	.858	.000
Stärke des Quereingriffs	1	171.451	92.676	<.001	.206
Richtung des Quereingriffs	1	5.749	3.107	.079	.009
Richtung des Längseingriffs	1	.042	.023	.880	.000
Stärke des Längseingriffs *	1	.668	.361	.548	.001
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.376	.744	.389	.002
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.005	.003	.960	.000
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.521	.282	.596	.001
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.224	.121	.728	.000
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	9.211	4.979	.026	.014
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.071	.038	.845	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.019	.010	.920	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.625	.878	.349	.002
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	5.180	2.800	.095	.008
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.004	.002	.962	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	357	1.850			
Gesamt	377				
Korrigierte Gesamtvariation	376				

Tabelle 78: Spannweite der Längsbeschleunigung - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario der Engstelle.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	4.283	17.627	<.001	.484
Konstanter Term	1	382.836	1575.704	<.001	.815
Stärke des Längseingriffs	1	38.765	159.551	<.001	.309
Stärke des Quereingriffs	1	.138	.568	.452	.002
Richtung des Quereingriffs	1	.465	1.914	.167	.005
Richtung des Längseingriffs	1	2.110	8.686	.003	.024
Stärke des Längseingriffs *	1	.002	.010	.920	.000
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.041	.171	.680	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	14.302	58.867	< .001	.142
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.014	.059	.808	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.333	1.370	.243	.004
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.030	.125	.724	.000
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.067	.274	.601	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.302	1.244	.265	.003
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.251	1.034	.310	.003
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.008	.033	.856	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.051	.210	.647	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	357	.243			
Gesamt	377				
Korrigierte Gesamtvariation	376				

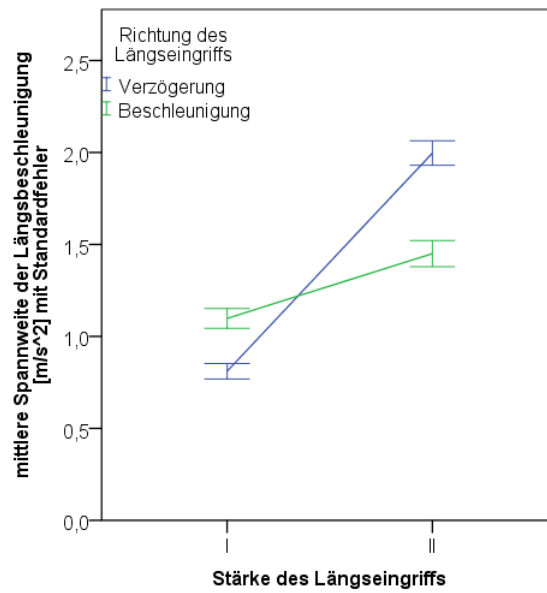


Abbildung 64: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für die Spannweite der Längsbeschleunigung.

Statistische Analysen und weitere Darstellungen zum Ergebnisteil des Fahrstreifenwechsels (Kapitel 5.2.4)

Tabelle 79: Ergebnisse der multivariaten Tests für das Prüfzenario des Fahrstreifenwechsels (Test: Pillai-Spur).

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Konstanter Term	.912	461.132 ^a	8.000	355.000	<.001	.912
Stärke des Längseingriffs	.372	26.267 ^a	8.000	355.000	<.001	.372
Stärke des Quereingriffs	.229	13.145 ^a	8.000	355.000	<.001	.229
Richtung des Quereingriffs	.643	79.908 ^a	8.000	355.000	<.001	.643
Richtung des Längseingriffs	.137	7.029 ^a	8.000	355.000	<.001	.137
Stärke des Längseingriffs *	.025	1.123 ^a	8.000	355.000	.347	.025
Stärke des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.025	1.156 ^a	8.000	355.000	.325	.025
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.171	9.183 ^a	8.000	355.000	.000	.171
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.125	6.335 ^a	8.000	355.000	<.001	.125
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.029	1.336 ^a	8.000	355.000	.224	.029
Richtung des Längseingriffs						
Richtung des Quereingriffs *	.280	17.222 ^a	8.000	355.000	<.001	.280
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.020	.885 ^a	8.000	355.000	.529	.020
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Quereingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.028	1.282 ^a	8.000	355.000	.251	.028
Stärke des Quereingriffs						
*Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.020	.904 ^a	8.000	355.000	.513	.020
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Quereingriffs *	.025	1.124 ^a	8.000	355.000	.346	.025
Richtung des Quereingriffs *						
Richtung des Längseingriffs						
Stärke des Längseingriffs *	.023	1.049 ^a	8.000	355.000	.399	.023
Stärke des Quereingriffs *						
Richtung des Quereingriffs						
Richtung des Längseingriffs						

Tabelle 80: Störungsbewertungen - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario des Fahrstreifenwechsels.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	16.886	7.732	<.001	.289
Konstanter Term	1	3372.607	1544.338	<.001	.810
Stärke des Längseingriffs	1	67.990	31.133	<.001	.079
Stärke des Quereingriffs	1	137.630	63.022	<.001	.148
Richtung des Quereingriffs	1	1.422	.651	.420	.002
Richtung des Längseingriffs	1	17.972	8.230	.004	.022
Stärke des Längseingriffs *	1	2.004	.918	.339	.003
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.733	.336	.563	.001
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	25.386	11.624	.001	.031
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.056	.025	.873	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.258	.118	.731	.000
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	35.246	16.139	<.001	.043
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.922	.880	.349	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.009	.004	.948	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.000	.458	.499	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	4.327	1.981	.160	.005
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	3.352	1.535	.216	.004
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	362	2.184			
Gesamt	382				
Korrigierte Gesamtvariation	381				

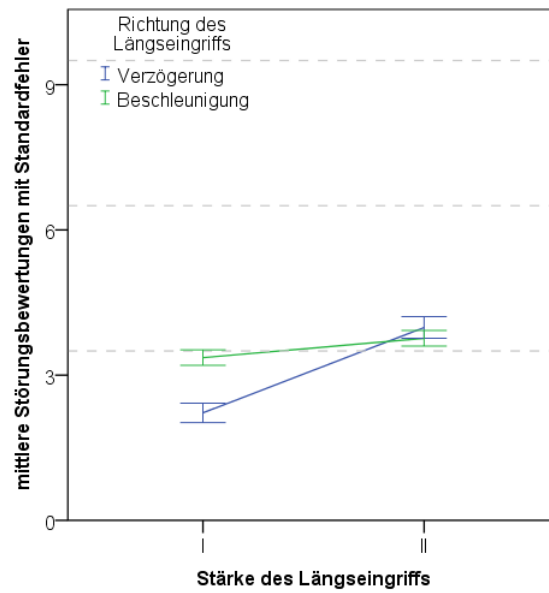


Abbildung 65: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für die Störungsbewertungen.

Tabelle 81: Maximaler Lenkradwinkel (Betrag) - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfszenario des Fahrstreifenwechsels.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	169.587	3.633	<.001	.160
Konstanter Term	1	27828.883	596.211	<.001	.622
Stärke des Längseingriffs	1	3.298	.071	.791	.000
Stärke des Quereingriffs	1	399.061	8.550	.004	.023
Richtung des Quereingriffs	1	2.846	.061	.805	.000
Richtung des Längseingriffs	1	397.988	8.527	.004	.023
Stärke des Längseingriffs *	1	37.490	.803	.371	.002
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	87.951	1.884	.171	.005
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	130.635	2.799	.095	.008
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	79.100	1.695	.194	.005
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	133.132	2.852	.092	.008
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	7.333E-5	.000	.999	.000
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	12.909	.277	.599	.001
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.564E-5	.000	1.000	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	16.623	.356	.551	.001
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	1.805	.039	.844	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	4.954	.106	.745	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	362	46.676			
Gesamt	382				
Korrigierte Gesamtvariation	381				

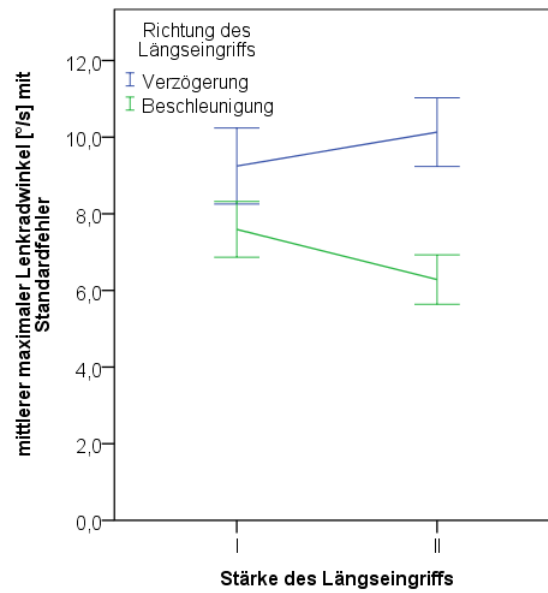


Abbildung 66: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für den maximalen Lenkwinkel.

Tabelle 82: Zeitpunkt des maximalen Lenkradwinkels - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario des Fahrstreifenwechsels.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	1.081	3.899	<.001	.337
Konstanter Term	1	53.927	194.448	<.001	.571
Stärke des Längseingriffs	1	1.247	4.498	.036	.030
Stärke des Quereingriffs	1	.062	.225	.636	.002
Richtung des Quereingriffs	1	1.374	4.953	.028	.033
Richtung des Längseingriffs	1	3.983	14.360	<.001	.090
Stärke des Längseingriffs *	1	.171	.617	.433	.004
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.461	1.662	.199	.011
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.948	3.418	.067	.023
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.002	.008	.931	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	4.954	17.863	<.001	.109
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.301	1.085	.299	.007
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.011	.040	.841	.000
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	3.750	13.521	<.001	.085
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.073	.264	.608	.002
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.200	.721	.397	.005
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.308	4.715	.032	.031
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	146	.277			
Gesamt	166				
Korrigierte Gesamtvariation	165				

Tabelle 83: Spannweite der Gierrate - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario des Fahrstreifenwechsels.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	69.735	5.918	<.001	.237
Konstanter Term	1	7993.366	678.402	<.001	.652
Stärke des Längseingriffs	1	.222	.019	.891	.000
Stärke des Quereingriffs	1	406.740	34.520	<.001	.087
Richtung des Quereingriffs	1	167.720	14.234	<.001	.038
Richtung des Längseingriffs	1	25.173	2.136	.145	.006
Stärke des Längseingriffs *	1	27.013	2.293	.131	.006
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.000	.000	.995	.000
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	2.576	.219	.640	.001
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	29.508	2.504	.114	.007
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	5.783	.491	.484	.001
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	174.181	14.783	<.001	.039
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	17.266	1.465	.227	.004
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	7.653	.649	.421	.002
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	1.115	.095	.759	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.487	.041	.839	.000
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	13.549	1.150	.284	.003
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	362	11.783			
Gesamt	382				
Korrigierte Gesamtvariation	381				

Tabelle 84: Spannweite der Längsbeschleunigung - Tests der Zwischensubjekteffekte für das Prüfzenario des Fahrstreifenwechsels.

Quelle	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta- Quadrat
Korrigiertes Modell	19	5.286	19.743	<.001	.509
Konstanter Term	1	338.350	1263.682	<.001	.777
Stärke des Längseingriffs	1	45.253	169.013	<.001	.318
Stärke des Quereingriffs	1	.261	.974	.324	.003
Richtung des Quereingriffs	1	.000	.001	.980	.000
Richtung des Längseingriffs	1	.007	.026	.872	.000
Stärke des Längseingriffs *	1	.034	.129	.720	.000
Stärke des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.054	.201	.654	.001
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	11.087	41.409	<.001	.103
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.150	.560	.455	.002
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.057	.211	.646	.001
Richtung des Längseingriffs					
Richtung des Quereingriffs *	1	.159	.596	.441	.002
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.326	1.218	.270	.003
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.822	3.070	.081	.008
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.407	1.519	.219	.004
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Quereingriffs *	1	.887	3.313	.070	.009
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Stärke des Längseingriffs *	1	.649	2.425	.120	.007
Stärke des Quereingriffs *					
Richtung des Quereingriffs *					
Richtung des Längseingriffs					
Fehler	362	.268			
Gesamt	382				
Korrigierte Gesamtvariation	381				

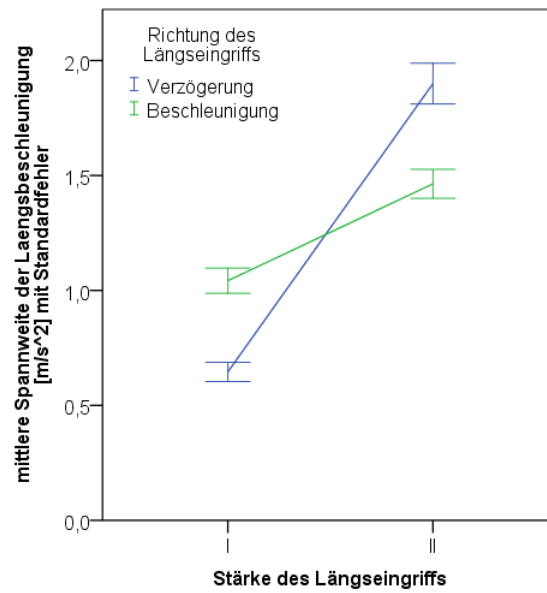


Abbildung 67: Darstellung der Interaktion zwischen Stärke und Richtung innerhalb der longitudinalen Eingriffskomponente für die Spannweite der Längsbeschleunigung.

Statistische Analysen und weitere Darstellungen zu Kapitel 6

Tabelle 85: Ergebnisse der ANOVA für die multiple Regression unter Berücksichtigung aller Fahrscenarien und Eingriffskombinationen.

	Quadrat summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	7.297	2	3.649	11.481	.001 ^a
Nicht standardisierte Residuen	4.131	13	.318		
Gesamt	11.428	15			

Tabelle 86: Korrelationen zwischen den mittleren Spannweiten der Gierrate und der Längsbeschleunigungen für die 16 Eingriffsbilder.

		Spannweite der Gierrate	Spannweite der Längsbeschleunigung
Spannweite der Gierrate	Korrelation nach Pearson	1	.175
	Signifikanz (2-seitig)		.517
	N	16	16

Tabelle 87: Ergebnisse der ANOVA für die multiple Regression unter Berücksichtigung der Eingriffe mit Beschleunigungskomponente in allen Fahrscenarien.

	Quadrat summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	3.185	2	1.592	31.862	.001 ^a
Nicht standardisierte Residuen	.250	5	.050		
Gesamt	3.435	7			

Tabelle 88: Ergebnisse der ANOVA für die multiple Regression unter Berücksichtigung der Eingriffe mit Verzögerungskomponente in allen Fahrscenarien.

	Quadrat summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	4.800	2	2.400	7.254	.033 ^a
Nicht standardisierte Residuen	1.654	5	.331		
Gesamt	6.454	7			